

Resumen

La importancia en la sustitución de tecnologías de generación de electricidad que tienen un gran impacto en el medioambiente ha facilitado el desarrollo de nuevas tecnologías con bajo impacto en el ecosistema. La pila de combustible se plantea como una alternativa a los actuales procesos de generación de electricidad, aunque actualmente la tecnología no está lo suficientemente desarrollada como para sustituir el actual mercado eléctrico.

Por este motivo, el presente proyecto se propone el estudio de los mecanismos, estructura y reacciones químicas de las pilas de combustible, así como los diferentes sistemas de refrigeración existentes para asegurar la funcionalidad del equipo a altos rendimientos. En este Trabajo de Final de Máster (TFM) se ha realizado una optimización del sistema de refrigeración de la pila de combustible del departamento IRI de la facultad de Matemáticas y Estadística (FME) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Al finalizar el presente proyecto, se ha evaluado el impacto medioambiental y social de la tecnología desarrollada por las pilas de combustible.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	2
1. GLOSARIO	5
2. INTRODUCCIÓN	8
2.1. Objetivos del proyecto	8
2.2. Alcance del proyecto.....	9
3. ANTECEDENTES. PILAS DE COMBUSTIBLE.	10
3.1. Descripción de las pilas de combustible.....	12
3.1.1. Principios y funcionamiento de las pilas PEM.....	13
3.1.2. Elementos principales pilas PEM.....	20
3.1.3. Tipos de pilas de combustible tipo PEM	25
3.1.3.1. Pila de combustible PEM de baja temperatura.	26
3.1.3.2. Pilas de combustible PEM de alta temperatura.....	28
3.2. Sistemas de refrigeración pilas de combustible tipo PEM.....	30
3.2.1. Generación y transporte de calor en pilas de combustible PEM.....	30
3.2.2. Refrigeración con difusores de calor.....	33
3.2.2.1. Sistema con materiales de conductividad térmica elevada	33
3.2.2.2. Sistema de tubos de calor como difusores de calor.	35
3.2.3. Refrigeración por flujo de aire	37
3.2.4. Refrigeración por líquido.....	37
3.2.5. Refrigeración por cambio de fase	39
3.2.6. Resumen de los diferentes sistemas de refrigeración para pilas PEMFC.....	39
4. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE LA PILA PEM.	41
4.1. Características principales de la pila del fabricante ZBT.	41
4.1.1. Módulo de la pila de combustible	41
4.1.2. Pila de combustible.....	42
4.1.3. Control de temperatura	43
4.1.4. Comportamiento eléctrico	44
4.1.5. Curva polarización de la pila de combustible HT-PEMFC de ZBT	44
4.2. Estudio de los diferentes sistemas de refrigeración disponibles	46
4.3. Modelización de los sistemas de refrigeración. (Cálculos)	48

4.3.1.	Datos iniciales.....	48
4.3.2.	Cálculos previos.....	50
4.3.2.1.	Análisis de parámetros constantes (h_a , k_p , $m_p c_{p_p}$).....	52
4.3.2.2.	Valores de los parámetros h_a , k_p , $m_p c_{p_p}$	54
4.3.3.	Modelo matemático del sistema de refrigeración.....	54
4.4.	Optimización del sistema de refrigeración.....	58
4.4.1.	Optimización del balance de energía.....	58
4.4.2.	Resultados y conclusiones de la optimización.....	60
4.4.3.	Propuesta para el sistema de refrigeración.....	61
4.4.3.1.	Aprovechamiento del calor generado.....	63
5.	RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	65
5.1.	Análisis económico del proyecto TFM.....	65
5.1.1.	Análisis de costes y elaboración de presupuestos.....	65
5.1.1.1.	Costes del estudio de ingeniería.....	66
5.1.1.2.	Costes de las pruebas experimentales.....	66
5.2.	Impacto medioambiental y social.....	66
5.2.1.	Impacto medioambiental.....	67
5.2.2.	Impacto social.....	68
6.	CONCLUSIONES	70
7.	AGRADECIMIENTOS	71
8.	BIBLIOGRAFÍA	72

1. Glosario

Este capítulo del proyecto tiene como objetivo identificar los símbolos, abreviaturas y acrónimos utilizados durante el proyecto.

AFC	Pilas de combustible alcalinas
CO	Monóxido de carbono (nomenclatura IUPAC)
E	Potencial eléctrico
F	Constante de Faraday
FME	Facultad de Matemáticas y Estadística
H₂	Hidrogeno (diatómico)
H₂O	Oxido de dihidrogeno (agua)
HHV	valor de calor superior (de sus siglas en inglés)
HT-PEMFC	Pilas de combustible de intercambio protónico de alta temperatura
LHV	Valor de calor inferior (de sus siglas en inglés)
LTPEM	Pilas de combustible de intercambio protónico de baja temperatura
MCFC	Pilas de carbonato fundido
MEA	Conjunto de electrodos de membrana
N_{Avg}	Número de moléculas por mol (Numero de Avogadro)
O₂	Oxigeno (diatómico)
PAFC	Facultad de Matemáticas y Estadística
PEM	Pilas de combustible de intercambio de protones mediante membrana
PEMFC	Pilas de intercambio protónico y pilas de metanol
PTFE	Polímero sulfonado de politetrafluoruoetileno
q	Carga eléctrica

SOFC	Pilas de óxido sólido
W_{el}	Trabajo eléctrico
ZAFC	Pilas de zinc-aire
ΔG	Energía libre de Gibbs
ΔH	Incremento de entalpía
ΔS	Incremento de entropía

A continuación se identifican todas las nomenclaturas y magnitudes que se han utilizado a lo largo de los cálculos del proyecto en las diferentes ecuaciones:

Parámetro	Nomenclatura	Unidades
Salto térmico ventilador	ΔT_{st}	[°C]
Intensidad resistencia	I_{res}	[A]
Voltaje resistencia	V_{res}	[V]
Resistencia	R_{res}	[ohm]
Densidad aire	ρ_a	[kg/m ³]
Calor específico aire	c_{p_a}	[J/kg·K]
Temperatura ambiente aire	T_{amb}	[°C]
Presión aire	P_{amb}	[atm]
Número de celdas	n_{celdas}	-
Separación entre aletas	S_{e_a}	[cm ²]
Altura aleta	H_{ala}	[cm]
Anchura aleta	A_{al}	[cm]
Grosor aleta	B_{al}	[cm]
Número aletas	n_{al}	-
Coeficiente de convección del aire	h_a	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Coeficiente de pérdidas de la pila	k_p	[W·K ⁻¹]

Parámetro	Nomenclatura	Unidades
Masa específica por calor específico pila	$m_p c_{p_p}$	$[J \cdot K^{-1}]$
Energía generada por la pila de combustible	Q_{gen}	$[W]$
Energía liberada por convección de las aletas	Q_{conv}	$[W]$
Energía generada por la resistencia eléctrica	Q_{res}	$[W]$
Energía liberada debido a las pérdidas de la pila	Q_{per}	$[W]$
Temperatura del aire de entrada	T_{al}	$[K]$
Temperatura del aire de salida	T_{aF}	$[K]$

2. Introducción

En el presente proyecto se realizará un estudio de los principios y rangos de operabilidad en una pila de combustible de alta temperatura de tipo PEM (Proton Exchange Membrane). Derivado de su complejo funcionamiento y los novedosos avances en dicha la tecnología, las pilas de combustible proporcionan muchas ventajas en comparación con las tecnologías de generación de energía eléctrica actuales (mayor eficiencia, disminución de emisión de contaminantes, espacio requerido, etc) pero, por otro lado, también supone una serie de inconvenientes. Uno de los más importantes es la gestión de la generación de calor al producirse la reacción electroquímica. En el presente proyecto se realizarán estudios de las diferentes opciones de sistemas de refrigeración en pilas de combustible tipo PEM y, mediante simulaciones, se realizará un estudio para llegar a la mejor solución posible para disminuir o mitigar el problema de la generación de calor.

La pila con la que se va a realizar el estudio y viabilidad de los cambios en el sistema de refrigeración es High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) stack (12 cells) fabricada por Zentrum für BrennstoffzellenTechnik para el uso del departamento IRI en la facultad de Matemáticas y Estadística de la Universidad politécnica de Cataluña (UPC).

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es realizar un estudio tecnológico y de viabilidad económica de las distintas posibilidades de aplicación de un sistema de refrigeración en una pila de combustible de alta temperatura y proponer una solución cuantificada de aplicación en el sistema de refrigeración de la pila de combustible que posee el departamento IRI.

Actualmente la pila de combustible que posee el departamento de IRI no funciona en los rangos de funcionamiento óptimos debido a que se trata de un prototipo y su aplicación es meramente de estudio para la UPC. Los materiales de la pila y la poca maduración de su diseño proporcionan problemas a la hora de trabajar en los rangos de temperatura óptimos. El objetivo del proyecto es realizar un estudio de las diferentes opciones de refrigeración de la pila de combustible y mitigar o disminuir los inconvenientes de la generación de calor en las reacciones que se desarrollan en el interior de la pila.

La optimización de la gestión térmica utilizada es primordial para poder realizar estudios sobre la pila con mayor precisión y, por tanto, más fidedignos.

2.2. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto consiste en la elaboración de un estudio teórico para la optimización del sistema de refrigeración de una pila de combustible tipo PEM de alta temperatura, en el que se tratará de cuantificar la mejor metodología de refrigeración de la actual pila PEM disponible en el departamento IRI.

En el proyecto se prevé realizar simulaciones de las diferentes opciones de refrigeración, o combinación de ellas, para determinar que diseño se ajusta mejor a las necesidades de la pila de combustible que se dispone en el departamento IRI. La viabilidad económica y medioambiental evaluada en el presente proyecto únicamente incluirá aquel sistema de refrigeración que se haya escogido siguiendo los criterios definidos. Quedaran fuera del alcance los sistemas de refrigeración que se hayan excluido.

Queda fuera del alcance del proyecto la ejecución de pruebas experimentales de la solución escogida del sistema de refrigeración.

3. Antecedentes. Pilas de combustible.

En la actualidad, las pilas de combustible están introduciéndose cada vez con más fuerza en la sociedad en la que vivimos. La apuesta por un dispositivo que genere electricidad de manera limpia y con una eficiencia mucho mayor en comparación con los dispositivos actuales, hace que las pilas de combustible sean el sustituto ideal de generación de energía en las futuras generaciones.

Debido al gran auge de este tipo de dispositivos, puede parecer que son un invento de los últimos años. La realidad es que el concepto de pila de combustible no es un invento moderno, sino que la primera vez que se introduce el concepto fue en 1839. La Figura 3.1 muestra la evolución cronológica de los dispositivos.

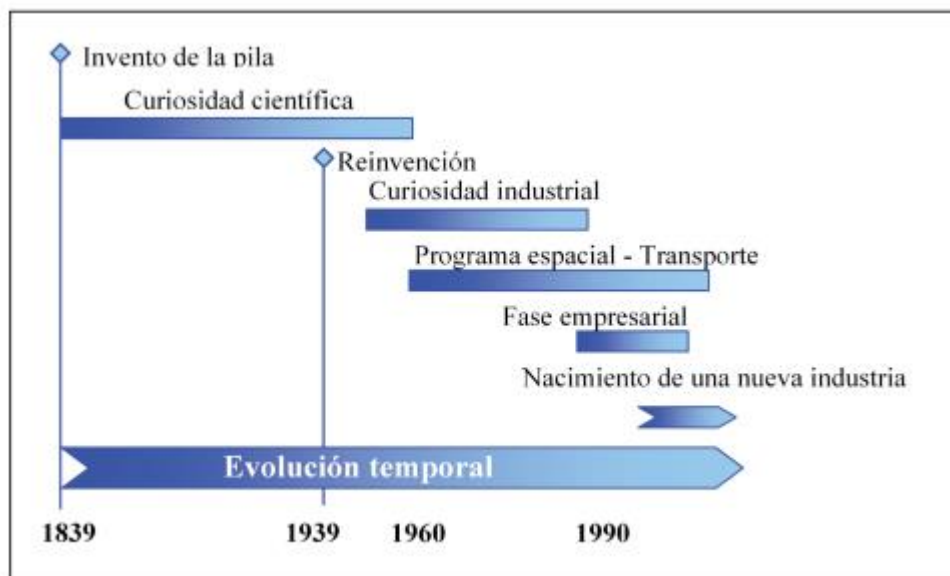


Figura 3.1. Cronograma de desarrollo de las pilas de combustible. *Fuente: Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM, 2012*

El inicio de las pilas de combustible fue en 1839, cuando Sir Willian Grove descubrió el principio de operación de estos dispositivos. Por otra parte, se han encontrado indicios de que otro científico, Christian F. Shönbein, habría descrito de forma independiente el mismo efecto de manera simultánea (o incluso antes). Pasaron más de 50 años (1900), cuando el científico Walther Nernst dedujera la ley termodinámica que rige el principio de funcionamiento de las células de combustible y, además, fue el primer constructor de la célula de combustible de óxidos sólidos o cerámica.

Después de la creación de la primera célula de combustible, se realizaron intentos esporádicos para diseñar un dispositivo práctico, ninguno de ellos alcanzó los principios de funcionamiento calculados por Grove. Fue en 1937, casi un siglo después, cuando se retomaron los trabajos sobre los dispositivos de forma práctica, desarrollando una pila de 6 kW a finales de la década de 1950. El nombre del creador del nuevo dispositivo era Francis T. Bacon.

El nuevo dispositivo fue un gran avance para los científicos para aplicarla al uso diario. Sin embargo, la primera aplicación práctica de las pilas de combustible tuvo lugar en el Programa Espacial de los Estados Unidos. Esta primera aplicación a principio de la década de 1960, cuando se desarrolló una pila alimentada por hidrógeno que se utilizó en el Programa Gemini. Este primer desarrollo fue seguido por el Programa Espacial Apolo (véase Figura 3.2) para el uso de actividades diarias y uso de las redes de telecomunicaciones. El dispositivo creado por Pratt y Whitney se basaba en la licencia de patente de Francis T. Bacon.



Figura 3.2. Pila de combustible utilizada en el Programa Espacial Apolo. *Fuente: Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM, 2012*

Fue a mediados de 1960 cuando una empresa del sector automovilístico, General Motors, incorporaba una pila de combustible. La creación de este dispositivo fue desarrollada por *Union Carbide* e introducida en una furgoneta.

La aplicación de las pilas de combustible ha conseguido mantenerse en las misiones espaciales de los EE.UU. y, hoy en día todavía siguen instalándose. No obstante, las pilas de combustible no tuvieron un impacto en las aplicaciones “terrestres” hasta finales de la década de 1990, en las que se empezaron a estudiar y probar las aplicaciones de los sistemas de

pilas de combustible en coches, autobuses, submarinos, etc.

La posición actual de las pilas de combustible es muy esperanzadora y, por este motivo, son muchos los gobiernos de países desarrollados que promueven leyes y políticas que tiendan a aumentar el nicho de mercado para esta tecnología. En la cabecera de los países propulsores de esta tecnología se encuentran EE-UU, Japón, Canadá y la Unión Europea. La investigación en esta tecnología para crear unos dispositivos más duraderos, fiables y a bajo coste ha creado una nueva industria, basada en una nueva revolución energética. Durante este periodo de tiempo se ha visto incrementado el número de patentes solicitadas sobre esta tecnología, lo que demuestra el continuo interés y participación de la comunidad científica e ingenieril de todo el mundo en su desarrollo.

3.1. Descripción de las pilas de combustible.

Las pilas de combustible son dispositivos capaces de generar energía eléctrica mediante la conversión electroquímica del combustible en electricidad, obteniendo como subproductos de la reacción agua y calor. A diferencia de las baterías convencionales, los productos de reacción son suministrados constantemente a la pila, y los productos de reacción eliminados. Actualmente las plantas térmicas dedicadas a la generación de energía eléctrica funcionan mediante procesos de conversión energética sujetos a ciclos termodinámicos que implican más fases del proceso de generación y, por consiguiente, más pérdidas energéticas intrínsecas. De esta manera, al no tener tantas fases de conversión de energía, la eficiencia de las baterías tradicionales es menor que los dispositivos que utilizan la tecnología de generación de electricidad mediante pilas de combustible. Así pues, una pila de combustible engloba todos los procesos y la generación de energía eléctrica en una sola fase (conversión directa) sin necesidad de introducir cualquier parte en movimiento (turbinas, generadores, etc).

A día de hoy existen diferentes clases de pilas de combustible, dependiendo del tipo de electrolito utilizado (sólido o líquido). Los diferentes tipos de pilas son utilizados en diferentes aplicaciones, dependiendo de las pautas de funcionamiento y características del proceso, como pueden ser la temperatura de operación los gases reactantes, los materiales utilizados para su construcción o incluso su vida útil y área de aplicación. La Figura 3.3 pretende resumir las características principales de los diferentes tipos de pilas de combustible disponibles.

	PEMFC / DMFC Pilas de intercambio protónico y pilas de metanol	AFC Pilas alcalinas	PAFC Pilas de ácido fosfórico	MCFC Pilas de carbonato fundido	SOFC Pilas de óxido sólido	ZAFC Pilas de Zinc-aire
Electrolito	Polímero sólido perfluor sulfonado	KOH	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃	KOH, LiOH, NaOH
Electrodos						
Ánodo	Pt/C	Ni, Ag, MeO	Pt/C	Ni poroso	Co-ZrO ₂ /Ni-ZrO ₂	Zn
Cátodo	Pt/C	Ni, Ag, MeO	Pt/C	NiO poroso	LaMnO ₃ + Si	MnO ₂
Matriz		Asbestos	SiC	LiAlO ₂		
Reacciones						
Ánodo	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{Zn} + 4\text{OH}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{OH})_4^{2-} + 2\text{e}^-$
Cátodo	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2 + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$
Global	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{ZnO}$
T [°C]	60-80	65-220	200	650	600-1000	0-60
Potencia	0-250 kW	10-100 kW	50 kW – 1 MW	0-1 MW	0-3 MW	90 W/kg
Eficiencia [%]	53-58% transporte 25-35% estacionario	60	>40	45-47	35-43	
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Back up ▪ Transporte ▪ Pequeñas aplicaciones móviles y domésticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Militar ▪ Aeroespacial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Domésticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantas de generación energética 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantas de generación energética ▪ Sistemas auxiliares 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Móviles y estacionarias

Figura 3.3. Clasificación de los tipos de pilas de combustible. *Fuente: Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM, 2012*

Actualmente este tipo de pilas son las más prometedoras en los nuevos mercados de la industria energética, dada sus aplicaciones de transporte, estacionarias, auxiliares o portátiles, además de su alta eficiencia, densidad de corriente elevada y baja temperatura de operación.

La pila de estudio del presente proyecto es la pila de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM) y, por este motivo, en los siguientes capítulos se proporcionará información sobre el funcionamiento, principios y características de este tipo de pilas para poder realizar un enfoque directo este tipo de dispositivos.

3.1.1. Principios y funcionamiento de las pilas PEM

Las pilas de combustible de intercambio de protones mediante membrana (PEM) se denominan así por una membrana polimérica que separa las dos partes más importantes de las celdas: la parte anódica y la parte catódica. Dicha membrana permite el intercambio de los iones H⁺ al tratarse de un conductor protónico, pero con la particularidad de ser impermeable al resto de sustancias. La Figura 3.4 muestra el diagrama de funcionamiento de las pilas de combustible tipo PEM. En la imagen se muestra las diferentes separaciones disponibles en la celda, así como el intercambio protónico y su consecuente generación eléctrica. Como se muestra en la imagen, la celda está compuesta por tres zonas: un electrodo cargado negativamente (cátodo), un electrodo cargado positivamente (ánodo), y en medio la

membrana electrolítica que separa físicamente los gases a ambos lados. El combustible utilizado en este tipo de pilas es hidrógeno y se introduce por los canales mecanizados en la placa bipolar por el lado del ánodo y guiado a través de una capa difusora de material carbonoso hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la reacción de oxidación del hidrógeno (Ec. 1). La capa difusora debe ser un material altamente poroso, de modo que facilite la difusión del hidrógeno para alcanzar más eficientemente las partículas del catalizador.

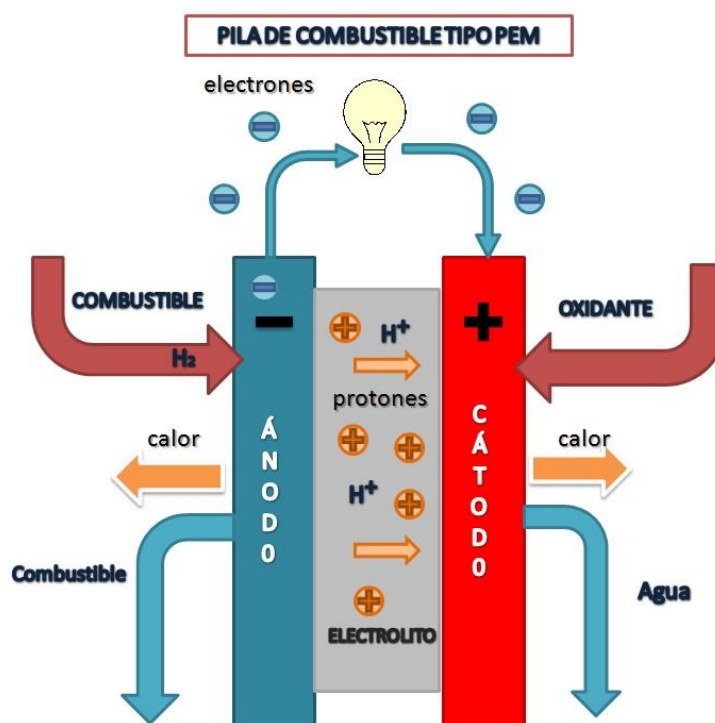


Figura 3.4. Diagrama del proceso electroquímico de las pilas de combustible tipo PEM. *Fuente:*

https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible#

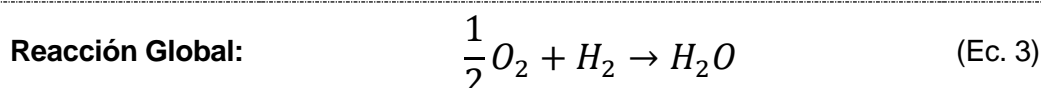
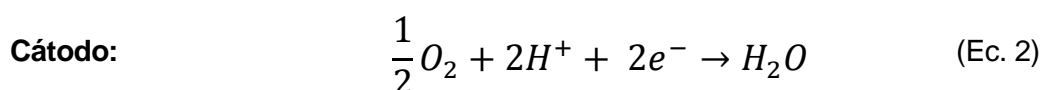
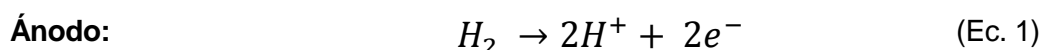
Los protones generados atraviesan la membrana polimérica de intercambio protónico, pero los electrones no pueden atravesarla, debido a que no permite el intercambio eléctrico y buscan la salida a través de un circuito alternativo, el cual está formado por las capas difusoras que permiten la conductividad eléctrica y las placas, creando una corriente eléctrica disponible para la aplicación en actividades que necesiten de ella. Por el otro lado de la celda, el aire entra a través de los canales del cátodo, entonces atraviesa la capa difusora y el oxígeno se combina en la capa catalítica con los protones que pasan a través de la membrana y los electrones del circuito exterior, generando agua y calor (Ec. 2). Estos dos subproductos son evacuados a través del flujo de gases en el cátodo y, en el caso del calor, además por convección (natural o forzada) con el medio que rodea la pila. El sistema de refrigeración de la pila es muy importante y debe estar diseñado cuidadosamente, ya que un mal diseño de la

refrigeración podría bajar el rendimiento de la pila y desgastar los materiales, por lo que disminuiría su durabilidad y aumentaría el coste.

En el caso de una configuración de varias mono celdas apiladas (lo que constituye realmente una “pila”), la circulación electrónica varía, ya que los electrones generados en el ánodo de una celda no se recombinan en la reacción catódica de la misma celda, sino en el cátodo de la celda adyacente. Es el proceso continuo de generación y recombinación en celdas consecutivas lo que provoca una circulación electrónica global a través del sistema.

A continuación, se detallan las reacciones electroquímicas que se producen en el interior de la pila para la conversión de energía química en energía eléctrica:

Ecuación 3.1. Ecuaciones de las reacciones químicas en una pila de combustible PEM.



La descripción que se ha realizado del proceso electroquímico quiere mostrar de manera simplificada las diversas reacciones y fases que se generan en el interior de una pila de combustible. Así como teóricamente puede parecer que las pilas de combustible tienen un funcionamiento sencillo, en la práctica presenta muchas dificultades técnicas. Existen diferentes factores que pueden crear inconvenientes a la hora de poner en práctica este tipo de dispositivos, pero los que más criticidad y problemas generan son la gestión del agua y el calor. Tanto si disponemos de un exceso o un defecto de estos dos factores, las propiedades de la membrana se ven afectadas, haciendo que el funcionamiento de la pila empeore.

En un dispositivo electroquímico H_2/O_2 el hidrógeno es oxidado con oxígeno para crear H_2O en una reacción exotérmica, la cual cosa proporciona una generación elevada de calor a la pila (Ec. 3).

La energía química contenida en cualquier combustible se denomina *Heating value* (valor de calentamiento), también llamado entalpía de una reacción de combustión. Se define a la entalpía de reacción como la cantidad de calor que podría generarse en una combustión completa de 1 mol de combustible. En el caso del hidrógeno, su valor es de $286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Dadas las condiciones de presión y temperatura necesarias (1 bar y 25°C), una combustión completa de 1 mol de hidrogeno reaccionando con medio mol de oxígeno, el producto resultante sería agua en estado líquido (Figura 3.5). Si se midiese la energía liberada en la combustión, debería ser aproximadamente de 286 kJ de calor liberado. El valor del calor

liberado en la combustión de hidrógeno y oxígeno, dando como producto agua en estado líquido se denomina *higher heating value* (HHV). Por otro lado, si la reacción de combustión se realiza con un exceso de oxígeno, o en su defecto aire, y permitiendo una temperatura por debajo de los 25°C, el producto resultante de la combustión volvería a ser agua, pero esta vez en forma de vapor mezclada con el exceso de oxígeno y nitrógeno (en caso de incluir aire como comburente de la combustión) no reaccionado (Figura 3.6). Al medir el calor liberado en este experimento, el valor obtenido sería de 241 kJ. El límite inferior de emisión de calor del agua (en forma de vapor) se denomina *lower heating value* (LHV).

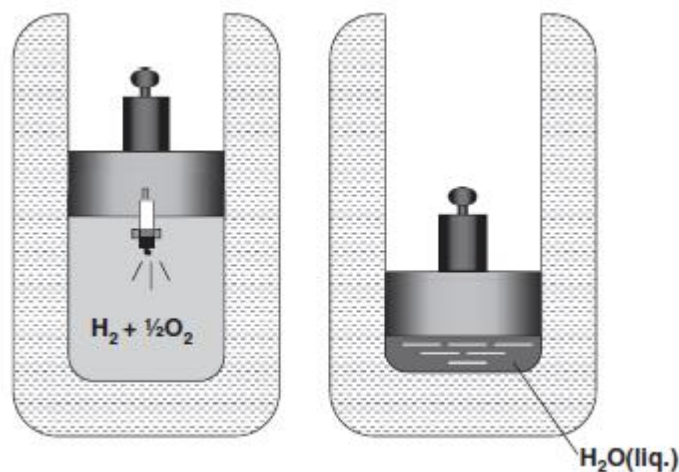


Figura 3.5. Reacción de combustión completa de hidrógeno y oxígeno a condiciones atmosféricas (1bar, 25°C). Medición del HHV. Fuente: Branir, F. *PEM fuel cells. Theory and practice (second edition)*

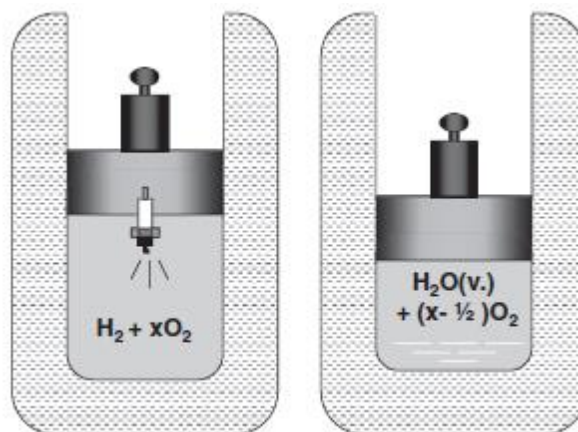


Figura 3.6. Reacción de combustión de hidrógeno con exceso de oxígeno. Medición del LHV. Fuente: Branir, F. *PEM fuel cells. Theory and practice (second edition)*

Los valores de LHV y HHV son importantes para entender el funcionamiento de una pila de combustible. El valor de calentamiento del hidrógeno se utiliza como medida de energía entrante en una pila de combustible. Este es la máxima cantidad de energía térmica que podría liberarse procedente del hidrógeno. En un principio se podría intuir que toda la energía liberada por el hidrógeno se transforma en electricidad, pero no es así. En todas las reacciones químicas se produce entropía y, debido a esto, una parte del HHV no puede convertirse en trabajo útil (electricidad). La parte de la entalpía de reacción (o HHV) que es propicia para que se convierta en electricidad en la pila de combustible corresponde a la energía libre de Gibbs, representada en la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{Ec. 4})$$

En otras palabras, existen algunas pérdidas irreversibles de energía en la conversión debido a la creación de entropía (ΔS).

De forma parecida al cálculo del incremento de entalpía (ΔH) de la reacción (Ec. 3) que consiste en la diferencia entre el calor de formación de los productos y reactivos (Ec. 5), el incremento de entropía se calcula como la diferencia entre entropías de productos y reactivos (Ec. 6)

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{O_2} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\Delta S = (s_f)_{H_2O} - (s_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(s_f)_{O_2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Los valores de h_f y s_f de la reacción de reactivos y productos a temperatura y temperatura ambiente se muestran en la Tabla 1.

Es por eso por lo que, a 25°C, de los 286.02 kJ·mol⁻¹ de energía disponible, 237.34 kJ·mol⁻¹ puede convertirse en energía eléctrica y los 48.68 kJ·mol⁻¹ restantes se convierten en calor. A temperaturas distintas a 25°C estos valores varían.

Tabla 1. Entalpías y entropías de formación de reactivos y productos en una pila de combustible (25°C, 1 atm)

Reactivo / Producto	h_f (kJ·mol ⁻¹)	s_f (kJ·mol ⁻¹ ·mol)
Hidrógeno (H ₂)	0	0.13066
Oxígeno (O ₂)	0	0.2051
Agua (líquida) (H ₂ O (l))	-286.02	0.06996
Agua (vapor) (H ₂ O (g))	-241.98	0.18884

En general, el trabajo eléctrico es producto de la carga eléctrica (q) i el potencial eléctrico (E):

$$W_{el} = q \times E \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde el trabajo eléctrico (W_{el}) se mide en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$, la carga eléctrica (q) en Culombios $\cdot \text{mol}^{-1}$ y el potencial eléctrico (E) medido en Volts. Para realizar el cálculo de la carga transferida en las reacciones de las pilas de combustible por mol consumido de H_2 es igual a:

$$q = n \times N_{Avg} \times q_{el} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

n = Numero de electrones por molécula de H_2 = 2 electrones por molécula

N_{Avg} = Número de moléculas por mol (N^0 Avogadro) = 6.022×10^{23} moléculas/ mol

q_{el} = Carga de 1 electrón = 1.602×10^{-19} colombos/ electrón

El producto del número de Avogadro y la carga eléctrica se conoce como *Constante de Faraday*: $F = 96486 \text{ colombos/ electrón} \cdot \text{mol}$.

Combinando la constante de Faraday, la ecuación de trabajo eléctrico (ec. 77) y la ecuación de la carga eléctrica (ec. 8), obtenemos como resultado:

$$W_{el} = n \times F \times E \quad (\text{Ec. 9})$$

Por otro lado, la máxima cantidad de energía eléctrica generada por una celda de combustible corresponde a la energía libre de Gibbs (ΔG) (ec.10). Con esta equivalencia, obtenemos que la potencia teórica de una celda de combustible es entonces el cociente entre la energía libre de Gibbs entre el producto del número de moles por la constante de Faraday (ec. 11)

$$W_{el} = -\Delta G \quad (\text{Ec. 10})$$

$$E = \frac{-\Delta G}{n \times F} \quad (\text{Ec.11})$$

Utilizando la ecuación 11, y sabiendo los valores de ΔG , n y F , podemos calcular el voltaje teórico de una celda de combustible para una pila de tipo PEM que emplee la combustión entre H_2 y O_2 a una temperatura de 25°C :

$$E = \frac{-\Delta G}{n \times F} = \frac{237,340}{2 \times 96485} \frac{J \times mol^{-1}}{As \times mol^{-1}} = 1.23 \text{ Volts} \quad (\text{Ec.12})$$

El voltaje calculado es teórico y únicamente se cumple si las condiciones de temperatura se mantienen. En casos prácticos, la eficiencia y el valor del voltaje disminuye respecto del valor teórico (ideal) debido a las pérdidas irreversibles que tienen lugar debido a la diferencia entre el potencial del electrodo y el potencial de equilibrio. En la Figura 3.7 se identifica la pérdida de voltaje.

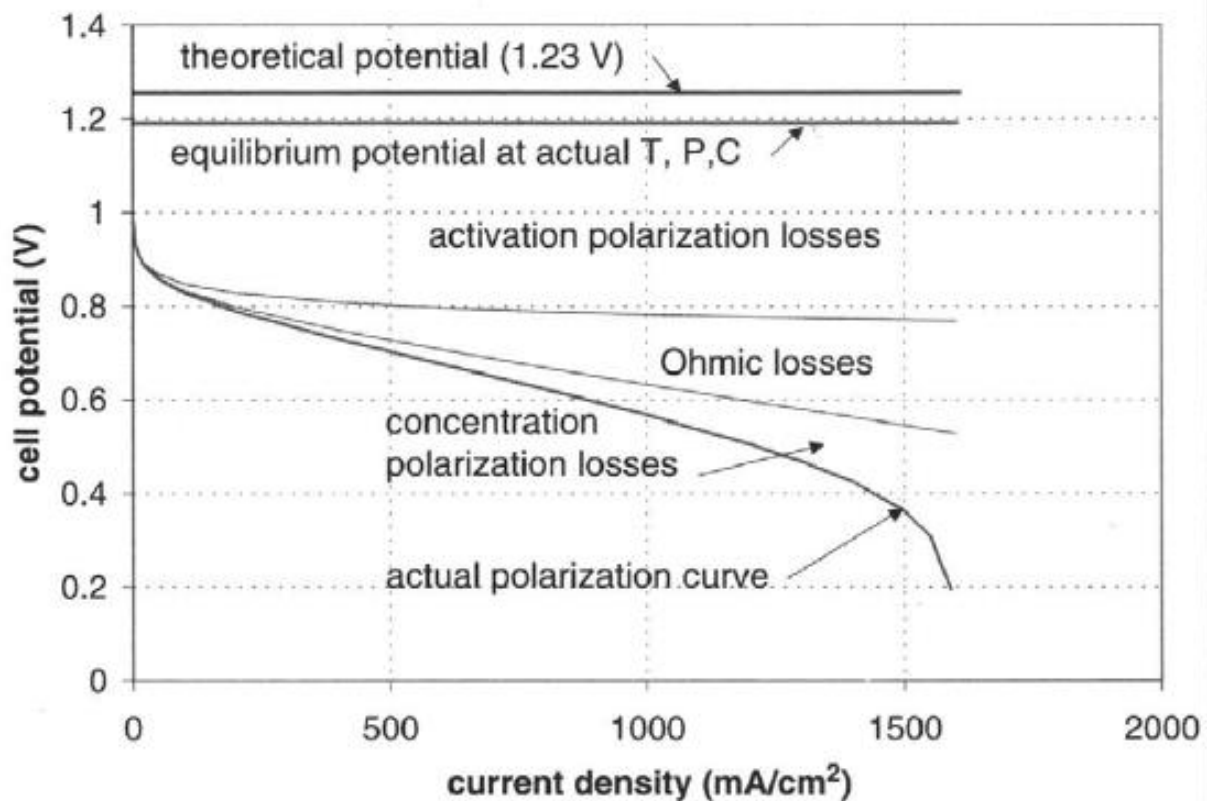


Figura 3.7. Pérdida de voltaje en celdas de combustible y resultado de la curva de polarización.

Fuente: Barbir, F. PEM fuel Cells. Theory and practice (2005).

Las pérdidas identificadas en el gráfico de la curva de polarización se diferencian según en qué región se producen. A continuación se describen las pérdidas de voltaje:

- **Pérdidas por activación:** provienen de la energía de activación de las reacciones electroquímicas en los electrodos. Depende del material y la microestructura del electrocatalizador y de la actividad química de los reactivos y, por tanto, su utilización.
- **Pérdidas Óhmicas:** se deben a la resistencia iónica en el electrolito y los electrodos, a la resistencia electrónica en los electrodos y colectores y a la resistencia de contacto. Son proporcionales a la densidad de corriente y dependen del tipo de material utilizado, la geometría de la pila y la temperatura.

- **Pérdidas por concentración:** También identificada como transporte de masa. Son el resultado de las limitaciones, debido a las tasas finitas de transferencia de masa de los reactivos y dependen de la densidad de corriente y la estructura de los electrodos y las placas.

3.1.2. Elementos principales pilas PEM

Para el buen funcionamiento de las pilas de combustible es necesario que los materiales y elementos que la forman estén correctamente diseñados y soporten las condiciones de temperatura y presión que se originan en el interior de la pila. En la Figura 3.8 se identifican las diferentes partes de las que se componen las pilas de combustible de tipo PEM. Los elementos más importantes son: la membrana de intercambio de protones, los electrodos (ánodo y cátodo), las capas difusoras y el catalizador. Adicionalmente se incluyen elementos auxiliares de suministro de reactivos, gestión de calor y control. En el aspecto de la gestión de calor en las pilas de combustible, se contemplarán las diferentes soluciones disponibles de sistemas de refrigeración. La descripción de los sistemas de refrigeración se explicará en apartado 3.2 Sistemas de refrigeración pilas de combustible tipo PEM del presente proyecto.

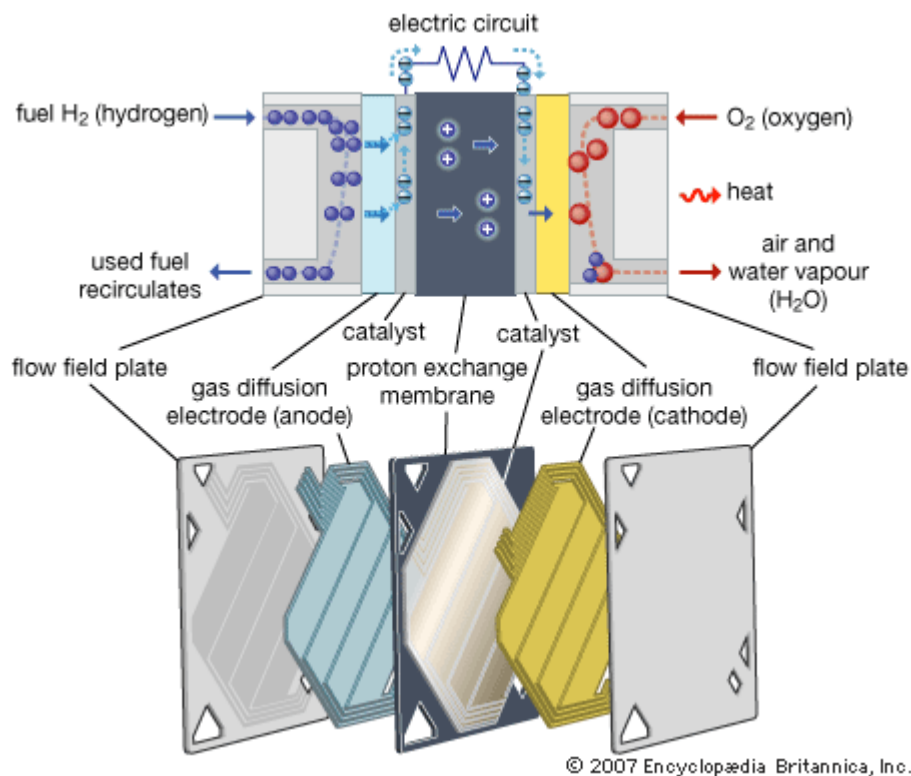


Figura 3.8. Elementos principales de una pila de combustible para su correcto funcionamiento.

Fuente: <http://www.writeopinions.com/proton-exchange-membrane>

En la parte superior de la imagen se ilustra el flujo de los reactivos en la pila de combustible PEM. Durante el transcurso de la generación de electricidad los reactivos van sufriendo diferentes cambios físicos y químicos para favorecer la conversión de energía química en eléctrica. Para ello, es muy importante el diseño de los elementos de la pila de combustible y su correcta instalación para favorecer la correcta reacción de los reactivos.

Electrolito: el electrolito es la parte que identifica a las pilas de combustible tipo PEM, ya que proporcionan el intercambio de protones entre el ánodo y el cátodo. El electrolito en el caso de las pilas PEM es una membrana de naturaleza polimérica, sólida compuesta por un polímero sulfonado de politetrafluoroetileno (PTFE). Algunas de las propiedades más importantes de este tipo de membranas es que poseen un alto grado de conducción protónica a través de ellas, son impermeables a los gases (no permite el flujo de H_2 y O_2) y son aislantes eléctricos (No permiten el flujo de electrones). A pesar de poseer unas propiedades excepcionales para el funcionamiento de la pila de combustible PEM, este tipo de membranas tienen ciertos inconvenientes que pueden perjudicar el funcionamiento (rendimiento) de las pilas. Se ha comprobado que la cantidad de agua contenida en el polímero es determinante en el funcionamiento de una pila. Una correcta hidratación fomenta la circulación protónica al formarse mayor número de clúster conductivos o dipolos reorientados. Esta propiedad reduce la existencia de resistencia iónica, por lo que permite el intercambio de iones entre las placas de electrodos. Por ese motivo es tan importante la gestión del agua en las pilas de combustibles que son diseñadas con este tipo de membranas.

Electrodo: Un electrodo en una pila de combustible es esencial que disponga de una fina capa de catalizador entre la membrana iónica y la sustancia eléctricamente conductiva. Este es el lugar donde las reacciones electroquímicas tienen lugar. Más concretamente, las reacciones se desarrollan en la superficie catalítica. Realmente, existen tres tipos de especies que participan en las reacciones electroquímicas: gases, electrones y protones. La parte donde se encuentra el catalizador es donde confluyen estos tres elementos y se crean las reacciones.

Los electrones viajan a través de los sólidos conductibles, incluyendo el propio catalizador, pero es importante que las partículas del catalizador se ubiquen en algún lugar eléctricamente conectado al sustrato. Los protones viajan a través de ionómeros. Por lo tanto, el catalizador debe estar en contacto directo con el ionómero. Finalmente, los gases reactivos viajan únicamente a través de vacíos, por este motivo el electrodo debe ser poroso para permitir que se produzca la reacción.

Al mismo tiempo, el agua como producto de la reacción, debe ser correctamente eliminado, en todo caso, si no se realiza correctamente la liberación del agua podría inundarse el electrodo e impedir el acceso de oxígeno.

En la Figura 3.9 han representado las diferentes fases en las que se desarrollan las reacciones electroquímicas en una pila de combustible. Las reacciones tienen lugar en la frontera de las

tres fases llamadas fase ionomérica, sólida y de vacío.

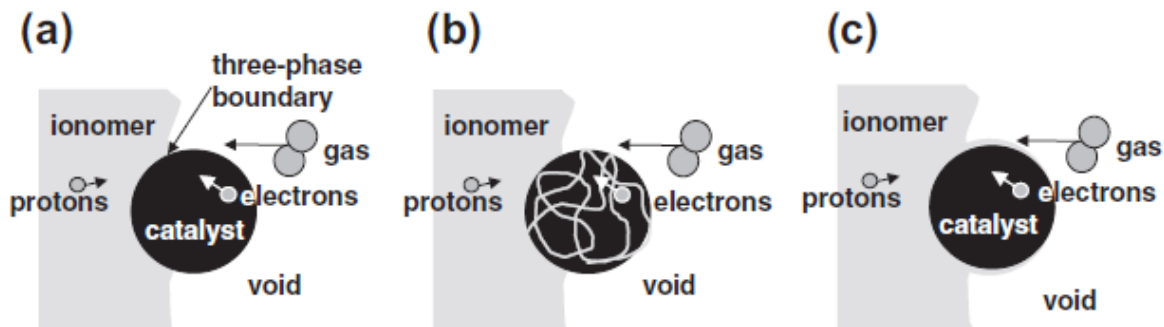


Figura 3.9. Representación gráfica de las fases de reacción de los reactivos en la pila de combustible.
Fuente: Barbir, F. *PEM Fuel cell Theory and practice* (2005).

Sin embargo, este límite tiene una infinitésima área pequeña (esencialmente es una línea y no un área) que daría como resultado densidades de corriente infinitamente grandes. En la práctica, dado que algunos gases pueden permeabilizarse a través del polímero, la zona de reacción es más larga que una simple línea límite de las tres fases.

La zona de reacción podría alargarse ya sea “raspando” la superficie de la membrana o por la incorporación de un ionómero en la capa del catalizador. En un caso extremo, la superficie del catalizador completa podría ser cubierta por una fina capa de ionómero y, de esta manera, se podría alargar la zona de reacción, a excepción de alguna asignación para contactos eléctricos. Obviamente, se deben optimizar las relaciones entre el área del catalizador cubierta por el ionómero y el área del catalizador abierta a la zona vacía del catalizador en contacto con otras partículas de catalizador o del soporte al conductor eléctrico.

Para minimizar las pérdidas del potencial de la celda debido a la velocidad de transporte de protones y la penetración de gas reactivo en la profundidad de la capa del catalizador, esta capa debe estar diseñada con unas dimensiones muy delgadas. Al mismo tiempo, se debe maximizar el área de superficie activa de metal, para lo cual las partículas de platino (Pt) deben ser lo más pequeñas posible.

La clave para mejorar el rendimiento de la pila de combustible PEM no está en aumentar la carga de Pt, sino más bien en aumentar la utilización de Pt en la capa de catalizador. El área activa de la superficie del catalizador puede aumentar mucho si se incluye ionómero en la capa de catalizador pintándolo con PFSA solubilizado en una mezcla de alcoholes y agua o preferiblemente premezclando el catalizador y el ionómero en un proceso de formación de la capa de catalizador.

En principio, hay dos formas de preparación de la capa de catalizador y su unión a la membrana de ionómero. Tal combinación de capas de membrana y catalizador se denomina

conjunto de electrodos de membrana o MEA.

Actualmente no hay electrocatalizadores catódicos alternativos para el platino, por lo que este elemento es el utilizado para diseñar catalizadores. Algunos electrocatalizadores de aleación de platino preparados en soportes tradicionales de carbón negro ofrecen una ganancia de rendimiento de 25 mV en comparación con los electrocatalizadores Pt.

Sin embargo, solo las aleaciones de metal basadas en Pt son más estables, como PtCr, PtZr o PtTi, pueden usarse en PEMFC, debido a la disolución del metal base con el ácido sulfónico perfluorado en la capa del electrocatalizador y la membrana. El objetivo de la búsqueda continua del elusivo electrocatalizador para la reducción de oxígeno en el medio ácido debe ser el punto de inflexión en el desarrollo de materiales con la estabilidad requerida y una mayor actividad que la que proporciona el platino actualmente.

Capas difusoras de gas: Las capas difusoras de gas son unas capas que se encuentran entre la capa de catalizador y las placas bipolares. Esta capa también se identifica como capa del sustrato de electrodo o colector de difusión y corriente. Aunque no participa directamente en las reacciones electroquímicas, la capa de difusión de gas en las celdas de combustible PEM tiene varias funciones que son importantes:

- Proporciona un camino para los gases reactivos desde los canales del campo de flujo a la capa de catalizador, lo que le permite el acceso a toda el área activa (no solo a los adyacentes a los canales).
- Proporciona un camino para el agua del producto desde la capa de catalizador hasta los canales de campo de flujo.
- Conecta eléctricamente la capa del catalizador a la placa bipolar, permitiendo que los electrones completen el circuito eléctrico.
- También sirve para conducir el calor generado en las reacciones electroquímicas en la capa del catalizador a la placa bipolar, que tiene un medio para eliminar el calor.
- Proporciona soporte mecánico al MEA, evitando que se hunda en los canales del campo de flujo.

Las propiedades requeridas de la capa de difusión de gas se derivan de sus funciones:

- Debe ser suficientemente poroso para permitir el flujo de ambos gases reactivos y el agua del producto (a tener en cuenta: estos flujos son en sentido opuesto). Dependiendo del diseño del campo de flujo, es importante la difusión en ambos planos y sobre el plano.

- Debe ser conductivo eléctricamente y térmicamente, de nuevo tanto en plano como sobre el plano. La resistencia interfacial o de contacto es típicamente más importante que la conductividad a granel.
- Debido a que la capa de catalizador está hecha de pequeñas partículas discretas, los poros de la capa de difusión de gas que enfrenta la capa de catalizador no deben ser demasiado grandes.
- Debe ser lo suficientemente rígido para soportar el "débil" MEA. Sin embargo, debe tener cierta flexibilidad para mantener buenos contactos eléctricos.

Estos requisitos, un tanto conflictivos, se alcanzan con una mayor fiabilidad utilizando materiales basados en fibra de carbono, ya sea con papeles de fibra de carbono y telas o telas de carbono tejidas.

El espesor de los materiales de difusión de gases comercializado por los actuales fabricantes oscila entre 0,017 y 0,04 cm, la densidad varía entre 0,21 y 0,73 g/cm³ y la porosidad varía entre 70% y 80%.

Placas bipolares: En una configuración de celda única (como la que se muestra en la Figura 3.8) no hay placas bipolares. Las dos placas en cada lado del conjunto del electrodo de membrana se pueden considerar como dos mitades de una placa bipolar. Las placas bipolares en pleno funcionamiento son esenciales para las configuraciones multicelulares (como se muestra en la Figura 3.10), que conectan eléctricamente el ánodo de una celda al cátodo de la celda adyacente.

Las placas colectoras y separadoras bipolares tienen varias funciones en una pila de combustible. Las propiedades requeridas se desprenden de sus funciones, como son:

- Conectan las celdas eléctricamente en serie; por lo tanto, deben ser eléctricamente conductoras.
- Separa los gases en celdas adyacentes, por lo tanto, deben ser impermeables a los gases.
- Proporcionan soporte estructural para la pila; por lo tanto, deben tener la resistencia adecuada, pero deben ser ligeras.
- Conducen el calor de las celdas activas a las celdas o conductos de enfriamiento, por lo tanto, deben ser térmicamente conductoras.
- Por lo general albergan los canales del campo de flujo; por lo tanto, deben ser

adaptables.

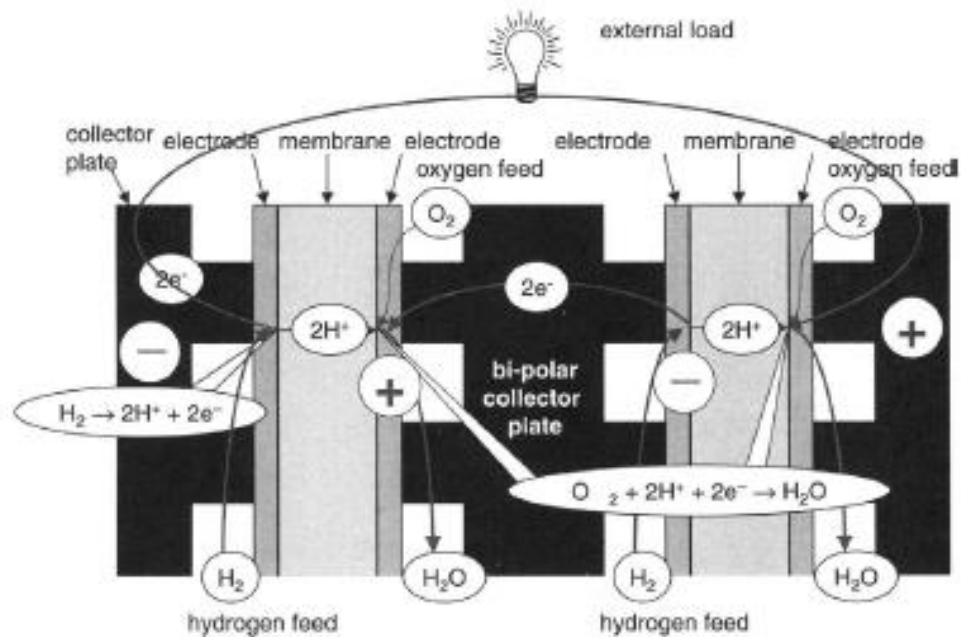


Figura 3.10. Placa bipolar conectada a dos celdas adyacentes y proporcionando una separación entre ellas. Fuente: Barbir, F. *PEM Fuel cell Theory and practice* (2005)

3.1.3. Tipos de pilas de combustible tipo PEM

En la actualidad existen diferentes tipos de pilas de combustible y, dependiendo de la funcionalidad que se le quiera aportar, es preciso estudiar las características principales de cada una de ellas para escoger el tipo de pila que más se ajuste a nuestras necesidades. Las pilas de combustible se dividen en diferentes categorías dependiendo de las propiedades de sus catalizadores, electrolitos, membranas, conductividad de protones, tipo de combustible, rango de temperaturas de funcionamiento, etc. Las principales pilas de combustible actualmente son las siguientes:

- Celdas de combustible PEM de baja temperatura
- Celdas de combustible de metanol directo.
- Celdas de combustible PEM de alta temperatura.
- Celdas de combustible de óxido sólido.

En el presente proyecto nos centraremos en las pilas de combustible PEM, ya que la pila en la cual se va a realizar el estudio es una pila de combustible PEM de alta temperatura.

3.1.3.1. Pila de combustible PEM de baja temperatura.

La categoría de baja temperatura de las pilas de combustible PEM (LTPEM) incluyen celdas de combustible utilizando diferentes tipos de membranas de polímeros, pero todas ellas con un factor en común, la necesidad de contener agua líquida en la membrana para asegurar la correcta conducción de protones.

La nomenclatura de baja temperatura para clasificar este tipo de pilas reside en su rango de temperatura de funcionamiento que es inferior a los 100°C (si el sistema no está presurizado y se utilizan principalmente catalizadores de platino. Las reacciones del ánodo y el cátodo de una pila de combustible LTPEM son las ya descritas en el apartado 3.1.1 (Ec. 1, ec. 2 y ec. 3).

A continuación se añade el gráfico de las curvas de polarización de pilas de combustible actualmente disponibles en el mercado (Figura 3.11). De las cinco pilas de combustible graficadas, cuatro de ellas se encuentran presurizadas a una temperatura de 80°C. La pila restante se encuentra en unas condiciones de presión atmosférica y a 65°C de temperatura.

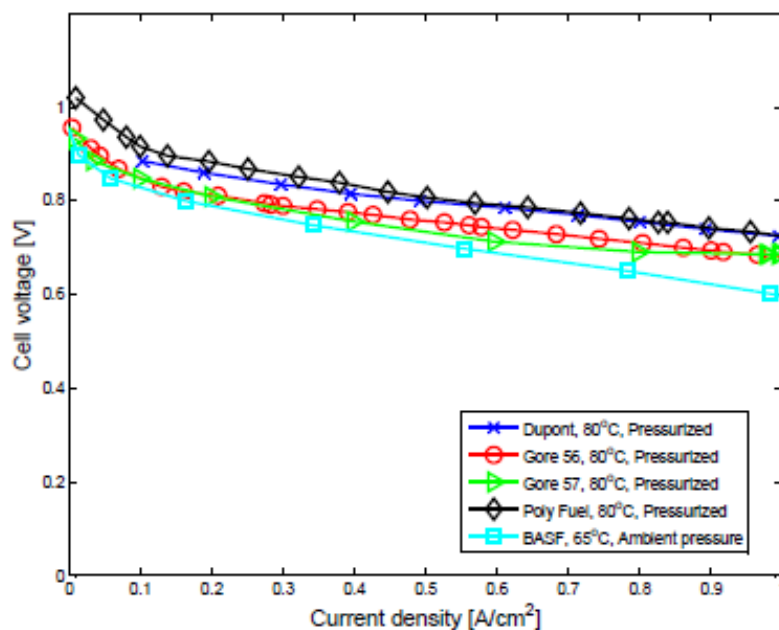


Figura 3.11. Curvas de polarización de diferentes pilas de combustible PEM de baja temperatura.

Fuente: Soren Juhl, A. Design and Control of High Temperature PEM Fuel Cell System (2009)

En la gráfica se puede observar que todas ellas alcanzan aproximadamente 1 V en el voltaje de la celda cuando la densidad de corriente es 0, siendo la pila de combustible BASF la inferior

de ellas. Durante la fase de pérdidas por activación las pilas “Gore 56”, “Gore 57” y “BASF” actúan de manera parecida, mientras que las pilas “Dupont” y “Poly fuel” tienen unas pérdidas más marcadas. Durante la fase de pérdidas óhmicas, la pila a presión atmosférica es la que sufre una mayor caída de voltaje. Al llegar a la pérdida por concentración, la pila a presión atmosférica no estabiliza la pérdida de voltaje. En las pilas de combustible presurizadas, la pila “Gore 57” es la única que estabiliza su pérdida de voltaje, al contrario de las otras, que pierden su voltaje de manera aproximadamente constante desde el inicio del rango de pérdidas óhmicas.

Las membranas poliméricas más utilizadas en las pilas de combustible LTPEM son de Nafión, que está basado en politetrafluoroetileno sulfonado (PTFE, también conocido como Teflón). La presencia de cadenas de sulfónico hidrofílico y áreas hidrofóbicas del polímero, permite la conducción de protones de forma correcta a través de la presencia de agua líquida en la membrana, y también una buena estabilidad mecánica. La humedad en la membrana es vital para el correcto funcionamiento de las pilas de combustible. Una MEA con una gran cantidad de humedad tiene riesgo de inundación, en las que se pueden crear grandes gotas de agua que bloqueen los canales de flujo y la capa de difusión de gases que desactiven los sitios catalíticos de la pila. Por otro lado, una gran sequedad en la membrana podría generar una pérdida rápida de conductividad de protones y podría proporcionar un fallo en la totalidad de la pila, ya que las celdas están conectadas en serie. Un incremento en la resistencia podría también crear lugares calientes que incrementen la temperatura de la celda de manera local. Sin embargo, existen muchos métodos de predicción y diagnóstico de inundación o sequedad de membranas en las pilas PEM de baja temperatura. Este riesgo es el más problemático en el área de esta tecnología. La Tabla 2 indica las ventajas e inconvenientes de las pilas de combustible LTPEM.

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de las pilas de combustible PEM de baja temperatura.

Ventajas	Inconvenientes
Elevado voltaje y eficiencia	Baja tolerancia de CO y pobre funcionamiento dinámico con CO.
Gran conocimiento y desarrollo en la tecnología	Complicada gestión de agua
Rango de temperaturas no requiere componentes del sistema especiales	Reformas externas son necesarias si es necesaria la utilización de otros combustibles.
Rápida puesta en funcionamiento desde bajas temperaturas.	La baja temperatura de operación requiere largas áreas de refrigeración.

Ventajas	Inconvenientes
	Las bajas temperaturas de funcionamiento requieren catalizadores económicamente caros.

3.1.3.2. Pilas de combustible PEM de alta temperatura.

La complicación del tipo de pila de combustible presentado en el apartado anterior depende de agua líquida como conductor de protones a través de la membrana. Esto a menudo puede dar como resultado una operación inestable y un sistema de humidificación y de recuperación de agua complicados. Además, las bajas temperaturas aumentan la complejidad de los sistemas de refrigeración necesarios al requerir grandes superficies de calor. Si la temperatura aumenta a más de 100°C, el agua del producto se vaporiza, por lo que a estas temperaturas tan elevadas es necesaria una membrana y un conductor de protones con propiedades diferentes.

Un ejemplo de membrana de pila de combustible tipo PEM de alta temperatura (HTPEM) es la membrana de polibencimidazol dopado con ácido fosfórico (PBI). PBI es un material típicamente usado en la producción de materiales resistentes al calor tales como los equipos de lucha contra incendios. Este polímero es en sí mismo un conductor de protones pobre, pero combinado con ácido fosfórico, las propiedades de conducción de protones aumentan de manera considerable. Existen diferentes métodos para añadir ácido fosfórico al polímero, y es necesario que se mantenga en la membrana dada su peligrosidad. Si las gotas de agua se condensan en la membrana, el ácido puede filtrarse en dichas gotas y eliminarse por los gases que salen de las celdas de combustible. Por estas razones, la condensación de agua es fatal para la pila de combustible. La Figura 3.12 presenta las curvas de polarización de pilas de combustible HTPEM a presiones atmosféricas. Debido a que no hay necesidad de agua líquida, tampoco hay riesgos de resecamiento o inundación de la membrana. Por lo tanto, también existe la posibilidad de enfriar la pila al suministrar grandes cantidades de aire de cátodo y, de este modo, no es necesario instalar un sistema de refrigeración por canales en la pila de combustible. Debido a que el rango de temperaturas de funcionamiento de las pilas HTPEM, las reacciones del ánodo con monóxido de carbono (CO) son mucho más rápidas, menos probabilidades de vincularse con sitios activos, y la pila de combustible es, por lo tanto, mucho más tolerante a este veneno. El tiempo de recuperación de voltaje también es significativamente más corto que las celdas de combustible LTPEM. En la Tabla 3 se

identifican las ventajas e inconvenientes de este tipo de pilas de combustible.

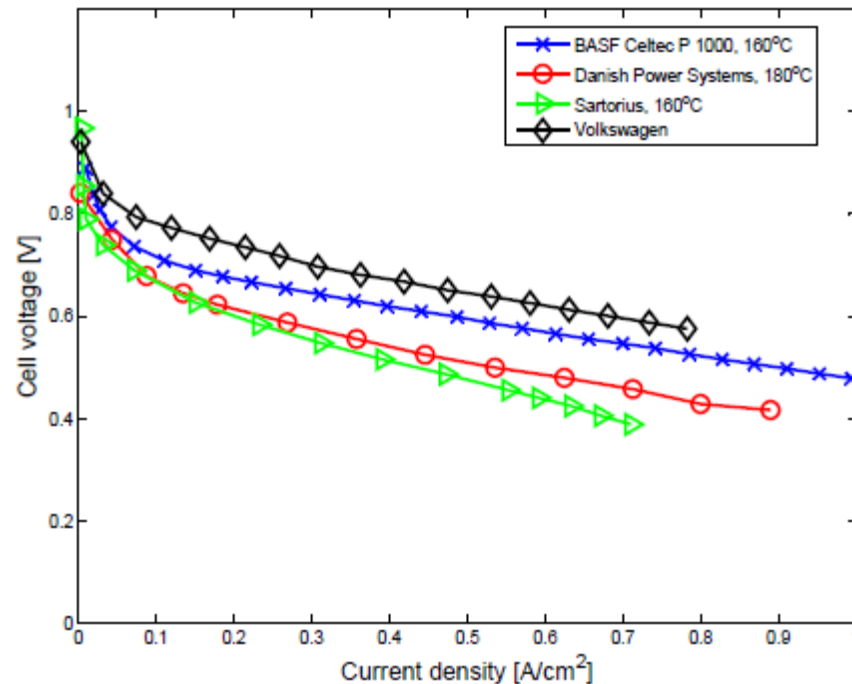


Figura 3.12. Curvas de polarización de pilas de combustible PEM de alta temperatura. Fuente: Soren Juhl, A. *Design and Control of High Temperature PEM Fuel Cell System* (2009)

En la gráfica se puede observar que, a diferencia de las pilas de combustible LTPEM, ninguna de ellas alcanza 1 V en el voltaje de la celda cuando la densidad de corriente es 0. Durante la fase de pérdidas por activación las pilas “Danish Power System”, “Volkswagen” y “BASF” actúan de manera parecida, realizando una pérdida de voltaje más o menos constante a lo largo de la fase de pérdidas óhmicas. Por otra parte, la pila “Sartorius” es la que más pérdidas obtiene a lo largo de esta fase. Durante la fase de pérdida por concentración, las pilas “Danish Power System” y “Sartorius” son las que se diferencian por perder más voltaje, aunque no es estrictamente marcado.

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de las pilas de combustible PEM de alta temperatura.

Ventajas	Inconvenientes
Al no necesitar la presencia de agua líquida incrementa la fiabilidad y simplicidad del sistema.	Bajo voltaje de la pila y baja eficiencia
El aire refrigerante del cátodo y el final del ánodo permiten diseñar un sistema simple y bajo en pérdidas parasitarias.	Gran demanda de materiales y componentes de alta temperatura y en presencia de H ₂ PO ₄

Ventajas	Inconvenientes
La alta tolerancia de CO reduce la complejidad de sistemas reformados.	Puesta en marcha de la pila lenta dada su alta temperatura de funcionamiento.
No existe presencia de agua líquida.	
Calor residual de alta calidad.	

3.2. Sistemas de refrigeración pilas de combustible tipo PEM

Las altas temperaturas que se alcanzan en las pilas de tipo PEM son el principal problema de este tipo de pilas. La temperatura es un parámetro crítico importante para el funcionamiento de las pilas PEM que afecta de manera directa e indirecta a la cinética de la reacción, transporte de agua, niveles de humedad, conductividad de la membrana, tolerancia catalítica, liberación de calor, estrés térmico en la membrana, entre otros. Por este motivo es muy importante disponer de sistemas de refrigeración que permitan una correcta liberación del calor generado en la pila y, de esta manera, favorecer el funcionamiento de la pila y la durabilidad de los materiales.

3.2.1. Generación y transporte de calor en pilas de combustible PEM

Existen cuatro fuentes de generación de calor básicas en las pilas PEMFC, que son:

- Calor de entropía de la reacción.
- Calor irreversible de las reacciones electroquímicas.
- Calor generado de la resistencia óhmica.
- Calor de condensación del vapor de agua.

Al diseñar un sistema de refrigeración en una pila de combustible es esencial disponer de información sobre la generación de calor en el interior de la pila. De esta manera, es posible describir los requerimientos necesarios para el diseño del sistema de refrigeración. El cálculo de generación de calor se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$q'' = (E_{tn} - E_{cell}) \times i \quad (\text{Ec.13})$$

Donde la variable q'' cuantifica el exceso de calor (en $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$), E_{tn} cuantifica el voltaje térmico, que representa el voltaje máximo ideal de una pila de combustible asumiendo que toda la entalpía de reacción se convierte en energía eléctrica. E_{cell} y la i son parámetros funcionales del voltaje de la pila y la densidad de corriente. Tal y como está definida la ecuación, el parámetro E_{tn} puede ser calculado basándose en el valor de calor superior (HHV) asumiendo que el producto del agua se transforma en agua en fase líquida o se puede asumir que el producto de agua se encuentra en fase vapor. En este caso se basaría en el valor de calor inferior (LHV). Los valores correspondientes son 1,48 V en HHV y 1,25 V en LHV en condiciones atmosféricas (25°C, 1 atm).

Estos valores se encuentran ligeramente por debajo de los valores en condiciones de funcionamiento normales de las pilas PEMFC. Tal y como se muestra en la ecuación 13, el rango de calor generado aumenta con el aumento de la densidad de corriente y disminuye el voltaje de la pila. Por otro lado, el rango de generación de calor en PEMFCs es elevado a altas densidades de corriente, excediendo la potencia eléctrica de salida, tal y como se muestra en la Figura 3.13. Este hecho supone un gran reto en la refrigeración de las pilas, especialmente las que intervienen en aplicaciones automovilísticas que requieren un alto funcionamiento de densidad de corriente de una alta densidad de potencia.

Así como el cálculo del total de calor generado es bastante directo, el rango de calor local generado, que afecta al funcionamiento y la durabilidad de las PEMFCs, no es tan sencillo de cuantificar de manera precisa. El calor local generado varía a través del plano y en todas las direcciones. Para la generación de calor entre planos, hay una ligera discrepancia la distribución de calor generado por la entropía. Para la distribución de calor local en el plano, es normalmente no-uniforme debido a la interdependencia de la densidad de corriente local, temperatura, concentración de reactivos y el contenido del agua.

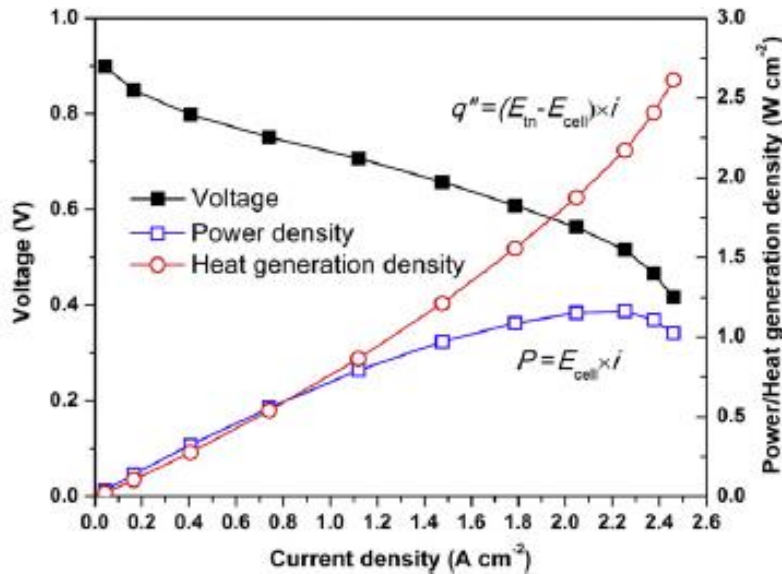


Figura 3.13. Diagrama de la generación de calor vs. generación de potencia en diferentes densidades de corriente (calculado con el valor de HHV). Fuente: Zhang, G., Kandlikar, S. *A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane cell stacks* (2011)

La existencia de la no-uniformidad en la distribución de la generación de calor en una pila PEMFC, complica e influye significativamente la temperatura local y los efectos de refrigeración. Por un lado, la compresión de los componentes en una pila PEMFC en funcionamiento es no-uniforme por debajo de las regiones y los canales, hecho que puede provocar variaciones en las propiedades térmicas. Por otro lado, la transferencia de calor está fuertemente relacionada con la distribución de agua y su transporte en una PEMFC en funcionamiento, que es otro problema crítico en el desarrollo de PEMFC. El transporte de agua impulsado por temperatura es un mecanismo de transporte de agua importante que, en los últimos años, ha atraído la curiosidad y atención de los expertos en el sector. Este hecho es un muy buen ejemplo que demuestra el fuerte acoplamiento de la transferencia de calor y el transporte de agua en un PEMFC operativo. Incluye la termo-osmosis en la membrana y el flujo inducido por el cambio de fase en medios de difusión porosa, los cuales dependen en gran medida del gradiente de temperatura y la temperatura promedio de los componentes. A cambio, dicho transporte de agua puede influir en gran medida en la transferencia de calor y la distribución de temperatura, y por lo tanto en la efectividad de la refrigeración de las pilas PEMFCs. Sin embargo, los datos experimentales de propiedades térmicas son todavía muy limitados y todo el trabajo emitido se ha realizado con métodos intrusivos que causan la modificación de los componentes de PEMFC y posiblemente influyan en sus propiedades térmicas.

3.2.2. Refrigeración con difusores de calor

El enfriamiento con difusores de calor, también llamado enfriamiento de borde o enfriamiento pasivo depende de la conducción de calor en la dirección del plano de las placas de enfriamiento para eliminar el calor de la región central hacia los bordes de la pila PEMFC. El calor puede eliminarse más fácilmente de los bordes que desde la región central de una pila. En comparación con el enfriamiento líquido activo, la estrategia de enfriamiento del borde no tiene circulación de refrigerante dentro de la pila y, por lo tanto, puede eliminar la necesidad de una bomba de refrigerante como la que se utiliza en los sistemas de refrigeración líquida convencionales. También puede reducir la masa y la complejidad del sistema de enfriamiento, y mejorar la fiabilidad general del sistema en comparación con el enfriamiento líquido convencional, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.14. Un desafío importante en la refrigeración con difusores de calor es que la conductividad térmica en el plano de las placas de enfriamiento debe ser muy alta para controlar la variación de temperatura a través del área activa. La utilización de materiales con conductividad térmica elevada y tubos de calor son los dos principales enfoques en este sistema de refrigeración.

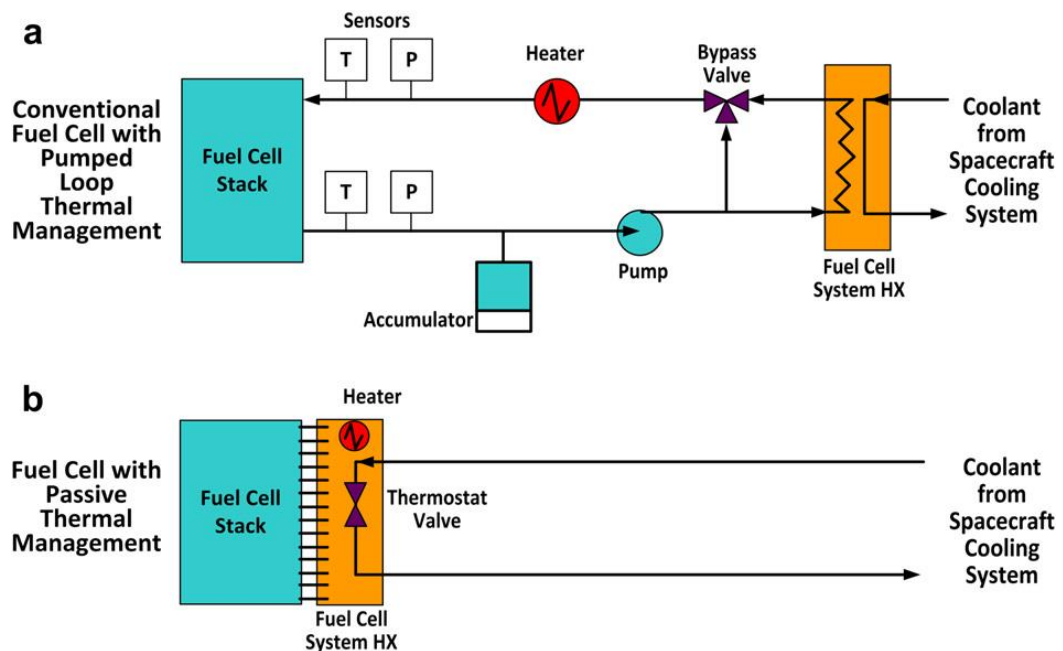


Figura 3.14. Comparación entre sistema de gestión térmica tradicional (a) y una gestión térmica pasiva (b). Fuente: Zhang, G., Kandlikar, S. *A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane cell stacks* (2011).

3.2.2.1. Sistema con materiales de conductividad térmica elevada

Los materiales más utilizados en los difusores de calor de refrigeración son el grafito expandido y el grafito pirolítico, debido a su alta conductividad térmica y su baja densidad.

Fluckiger et. al. desarrollaron una pila PEMFC de 500 W que utilizaba placas separadoras hechas por grafito expandido como difusores de calor (Figura 3.15). También desarrollaron un modelo térmico para analizar y optimizar el diseño de la pila. En el experimento se descubrió que la optimización requiere una compensación entre potencia específica y costo específico: una potencia específica alta requiere placas separadoras delgadas y áreas activas grandes, que, sin embargo, no son deseables desde el punto de vista de costes y las perspectivas de eliminación de calor.

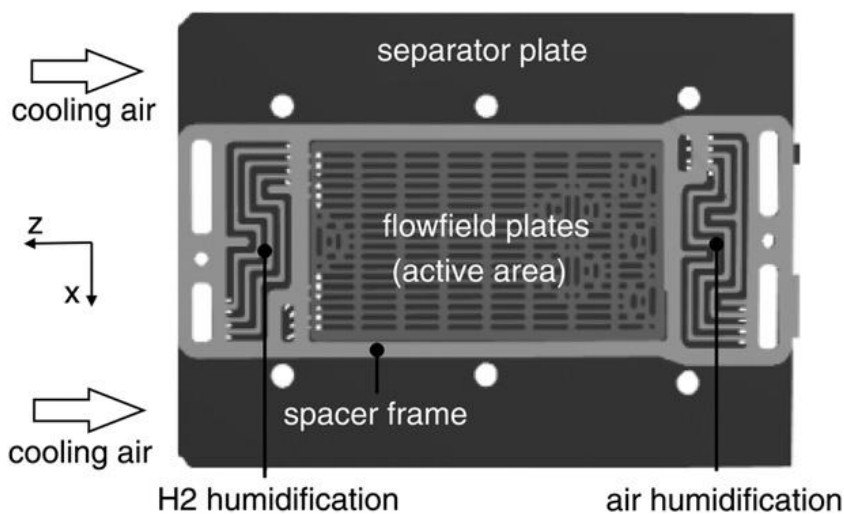


Figura 3.15. Vista en planta de una pila de combustible abierta. Fuente: Zhang, G., Kandlikar, S. A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane cell stacks (2011).

Wen et al. experimentalmente investigaron los efectos de las láminas de grafito pirolítico (PGS), que tiene una conductividad térmica en el plano muy elevada ($600\text{--}800\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), como difusor de calor en un solo PEMFC y en un apilamiento de 10 celdas. El PGS, con un grosor de 0,1 mm, se distribuyeron en forma de canales de flujo y se unieron con las placas del canal del gas del cátodo (Figura 3.16). Se midieron las distribuciones de temperatura en las placas y los resultados mostraban que el PGS reducía la temperatura máxima de la pila y mejoraba la uniformidad de la temperatura en una sola célula. El rendimiento de la pila con el PGS era más elevado y mejoró significativamente el problema de inundación en tasas bajas de flujo del cátodo, por lo que demuestra la viabilidad de utilizar el PGS para la gestión térmica de pilas pequeñas o medianas de PEMFC.

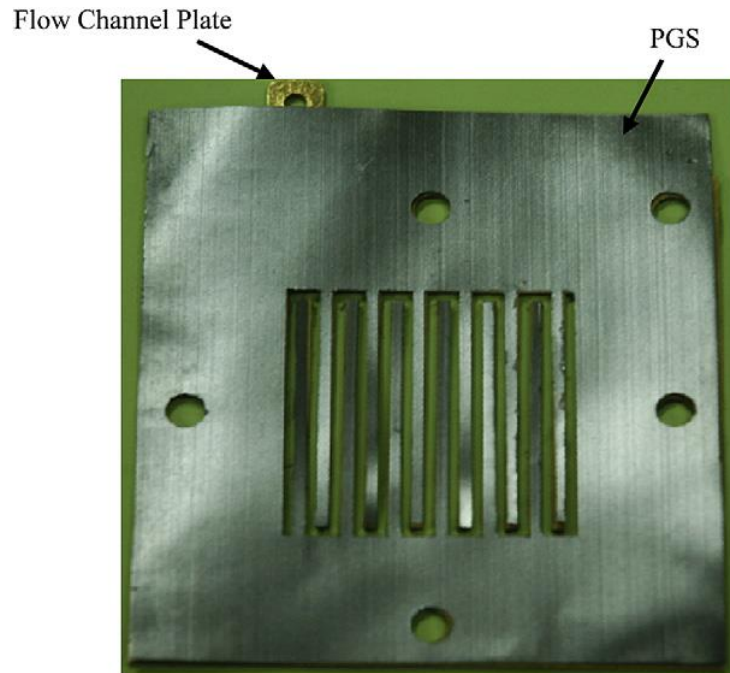


Figura 3.16. PGS precortado alineado con la placa del campo de flujo del cátodo. *Fuente: Zhang, G., Kandlikar, S. A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane cell stacks (2011).*

3.2.2.2. Sistema de tubos de calor como difusores de calor.

Las tuberías de calor tienen una alta conductividad térmica efectiva, incluso con un área pequeña de sección transversal pueden transportar grandes cantidades de calor a una distancia considerable sin entrada de alimentación adicional. Por este motivo, usar tubos de calor para el enfriamiento de las pilas PEMFC ha sido el centro de investigación en los últimos años. El diseño es uno de los principales desafíos a la hora de utilizar tubos de calor como difusores de calor, así como la fabricación de estos para que se puedan integrar en las pilas PEMFC.

Faghri y Guo describieron dos enfoques de integración de tubos de calor en una pila PEMFC. El primero fue la inserción de microtubos de calor en placas bipolares con la fabricación de agujeros (Figura 3.17). El reto de este enfoque es la fabricación de platos bipolares con el requisito de agujeros y sellado de las tuberías de calor dentro de los agujeros. El otro enfoque fue la integración de tubos de calor planos con los platos bipolares (Figura 3.17). La fabricación y sellado de las tuberías de calor podría ser también un reto. Vasiliev et al. también abogó activamente en la aplicación de tuberías de calor en la gestión térmica de PEMFC.

Se propusieron y desarrollaron diferentes tipos de tuberías de calor para pilas PEMFC con diferentes necesidades de disipación de calor, incluyendo micro y mini tubos de calor (1-10 W), tubos de calor de lazo (10-100 W), tubos de calor pulsante y de sorción (100-1000 W). Además, también se investigaron las características de transferencia de calor de diferentes

tipos de tuberías de calor y su transferencia de calor. Rulliere et al. investigaron experimental y numéricamente la aplicación de tuberías de calor plana, el cual lo denominaron difusor de calor de dos fases (TPHS), en sistemas de refrigeración PEMFC. Desarrollaron un TPHS planar con un área de evaporación (área de enfriamiento) de 190 mm x 90 mm. El TPHS estaba hecho de 109 microrranuras longitudinales mecanizadas en una placa de cobre. Usando metanol como fluido de trabajo, demostraron que la variación de temperatura en toda el área del evaporador era inferior a 1,6 K para una tasa de generación de calor de $0,5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ a una temperatura de 70 °C, condiciones de trabajo similares a las del funcionamiento de la pila tipo PEMFC. También se investigaron otros fluidos de trabajo y los resultados mostraron que la elección del fluido de trabajo es un factor importante a la hora de diseñar un sistema de refrigeración.

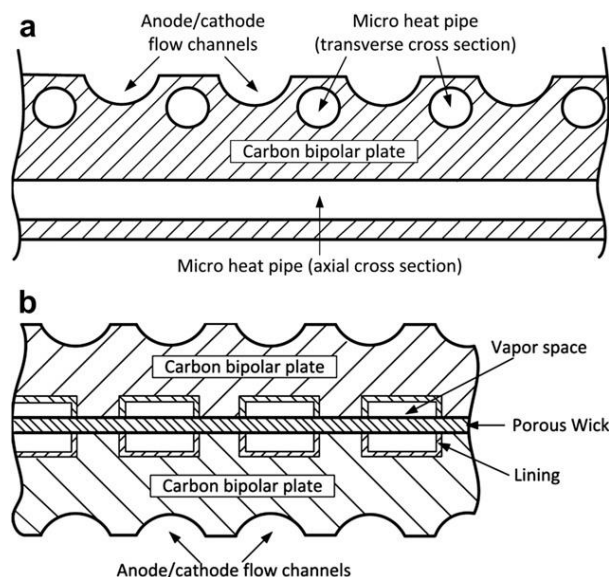


Figura 3.17. a) Tubo de microcalentamiento incrustado en una placa bipolar y **b)** tubo de calor de placa bipolar integrado. Fuente: Zhang, G., Kandlikar, S. *A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane cell stacks* (2011).

Recientemente, Burke et al. probó experimentalmente la conductividad térmica efectiva de las tuberías de calor planar diseñadas para el enfriamiento pasivo de las pilas de PEMFC para los programas de exploración de la NASA. Se realizaron pruebas con un tubo de calor plano de cobre y un tubo de calor planar de titanio, y los resultados se compararon con las placas de enfriamiento compuestas de HOPG. El tubo de calor plano de titanio era más delgado, más ligero y más efectivo que el tubo de cobre. El grosor de las placas utilizadas era de 1,19 mm y la conductividad térmica efectiva medida de hasta $20,447 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, un orden de

magnitud mayor que el de las placas de refrigeración compuestas de HOPG. La elevada conductividad efectiva de dicho tubo de calor plano lo hizo factible para grandes pilas PEMFC. La baja densidad de titanio también lo hizo más liviano que las placas de enfriamiento compuestas de HOPG.

3.2.3. Refrigeración por flujo de aire

La ventilación por flujo de aire es un sistema de enfriamiento muy importante en el funcionamiento de las pilas de combustible, no obstante, se debe tener en cuenta que el hecho de aumentar el suministro de aire del cátodo puede causar el secado de la membrana, lo que baja el rendimiento de la pila de combustible. Por este motivo, es razonable tener canales de suministro de aire separados para que fluya el flujo de aire sin empeorar las características de la pila.

Los canales de refrigeración se pueden hacer en las placas bipolares o en placas de refrigeración separadas que se colocan entre las placas bipolares. Esta estrategia de enfriamiento generalmente es adecuada para PEMFC que funcionan en el rango de 100 W a 2 kW. Para pilas PEMFC con potencia de salida superior a 5 kW, la refrigeración con aire puede no ser suficiente o no tan ventajoso como el enfriamiento líquido.

Recientemente, Matian et al. realizó un estudio numérico y experimental sobre el diseño de las placas de enfriamiento para una configuración de refrigeración por aire típico en una pila. Los resultados que obtuvo demostraron que una distribución uniforme de la temperatura podría lograrse aumentando los canales de enfriamiento dada una pérdida de presión, pero el problema reside en que las placas de una pila deben ser lo más delgadas posibles para que sea más compacta y así evitar una mayor caída de presión y un aumento de pérdida de potencia. En los estudios realizados se comprobó que no existía una uniformidad en la temperatura y que, además, la variación de temperaturas desde la parte superior era de 5°C más elevada que la de la parte inferior. La falta de uniformidad de temperatura afectó también a la diferencia de temperaturas que existía entre las celdas de la pila, con diferencias de hasta 8°C de una celda a otra.

En otros experimentos realizados sobre la eficacia de la refrigeración por aire, se descubrieron algunos efectos relacionados con la temperatura ambiente. La temperatura ambiente afectaba significativamente la máxima potencia y eficiencia neta, mientras que la humedad relativa del ambiente tenía efectos estadísticamente insignificantes.

3.2.4. Refrigeración por líquido

El coeficiente de transferencia de calor mediante flujo líquido es mucho más alto que con flujo de aire para una misma potencia. Es por eso que, el enfriamiento por líquido es el sistema de

refrigeración más utilizado en pilas de combustible tipo PEMFC de alta potencia (superiores a 5 kW).

El líquido más utilizado para este sistema de refrigeración es el agua desionizada que tiene una gran capacidad de aislamiento de calor, o un refrigerante anticongelante (p.e.: la mezcla de etilenglicol y agua para el uso bajo condiciones de temperatura ambiente inferiores a los 0°C). Similar a la refrigeración por flujo de aire, el sistema de enfriamiento por líquido se realiza mediante canales de enfriamiento que generalmente están integrados en las placas bipolares (Ver **Figura 3.18**). Además, es posible colocar más de una celda entre cada dos capas de líquido de enfriamiento y así reducir el número de capas de refrigeración. Sin embargo, se mostró a través de la modelización numérica que el rendimiento de la pila disminuye si la cantidad de celdas entre las dos capas de refrigeración sucesivas se incrementa. El motivo de los resultados de esta simulación se atribuyó al aumento de la temperatura y la disminución del contenido del agua en las membranas más alejadas de las capas de enfriamiento. Los resultados sugieren que simplemente la reducción del número de placas de refrigeración sin optimizar la configuración de los canales de refrigeración puede conducir a un menor rendimiento y un mayor riesgo de sobrecalentamiento de la membrana.

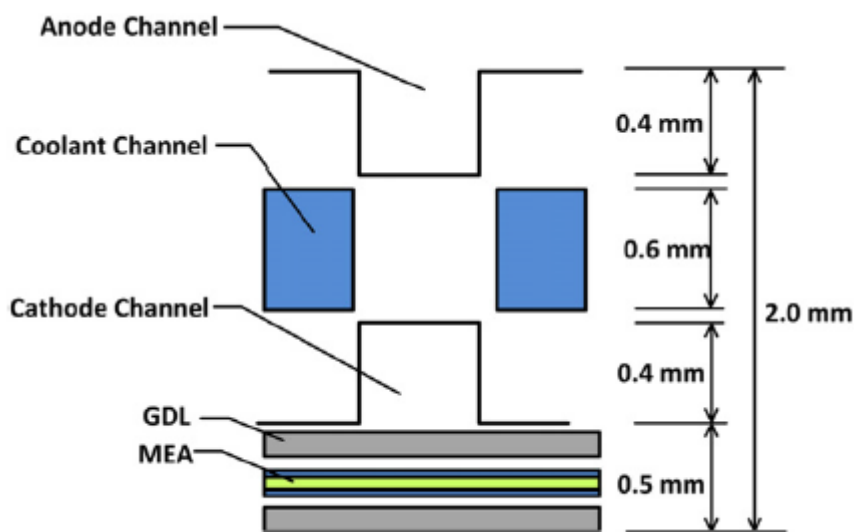


Figura 3.18. Esquema de una pila PEMFC de un automóvil con los canales de refrigeración. *Fuente: Zhang, G., Kandlikar, S. A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane cell stacks (2011).*

Debido a la amplia aplicación de refrigeración líquida, especialmente para pilas automotrices PEMFC, se han realizado numerosos esfuerzos para mejorar el rendimiento de refrigeración, incluida la optimización del diseño del campo de flujo del refrigerante, optimizar la geometría

del enfriamiento del canal, desarrollar alternativas a los refrigerantes actuales y optimizar el sistema de enfriamiento.

3.2.5. Refrigeración por cambio de fase

Aunque la refrigeración líquida se ha utilizado ampliamente en grandes pilas PEMFC con éxito, la refrigeración con cambio de fase del refrigerante tiene varias ventajas atractivas sobre el enfriamiento líquido, por ejemplo, reduce el caudal de refrigerante, simplificando el diseño del sistema y eliminando las bombas de líquido refrigerante. A diferencia del enfriamiento líquido que utiliza el calor sensible del refrigerante, el enfriamiento por cambio de fase utiliza el calor latente, que generalmente es muy elevado (p.e. Calor latente del agua es de 2250 kJ/kg a 1 atmósfera, más de 500 veces superior que el calor sensible absorbido por el agua líquida con un aumento de temperatura de 1 °C), y por lo tanto requiere un caudal refrigerante mucho menor. Además, el refrigerante se puede hacer circular con diferencial de presión o diferencias en la densidad, por lo que las bombas de refrigerante se pueden eliminar con el cambio de fase.

Existen básicamente dos enfoques de enfriamiento por cambio de fase: enfriamiento por evaporación y enfriamiento por ebullición. En el enfriamiento por evaporación, la temperatura de ebullición del refrigerante es más alta que la temperatura de la pila PEMFC y, por lo tanto, el agua es un refrigerante adecuado y se usa normalmente. Mientras se enfría durante la ebullición, la temperatura de ebullición del refrigerante debe ser menor que la temperatura de la pila PEMFC, que necesita una selección adecuada de refrigerantes.

3.2.6. Resumen de los diferentes sistemas de refrigeración para pilas PEMFC

Los diferentes sistemas de refrigeración descritos en los apartados anteriores tienen sus ventajas e inconvenientes y, dependiendo de las necesidades de cada pila de combustible serán necesarios unos sistemas u otros. A continuación, se detallan en una tabla las técnicas disponibles de cada uno de los sistemas de refrigeración, identificando sus respectivas ventajas, inconvenientes y desafíos tecnológicos para la óptima utilización de los sistemas de refrigeración:

Tabla 4. Resumen de los principales sistemas de refrigeración de pilas tipo PEMFC

ESTRATEGIA DE REFRIGERACIÓN	TÉCNICAS	VENTAJAS	INCONVENIENTES/ RETOS TECNOLÓGICOS
Difusores de calor	Materiales de conductividad térmica	Sistema simple	Longitud de transferencia de calor limitada
		No contiene refrigerante en el interior de la pila	Materiales con alta conductividad térmica y buenas propiedades mecánicas que sean económicamente asequibles.
		Potencia parasita baja	
	Tubos de calor	Sistema simple	Desarrollo de tubos de calor con pequeño grosor y bajo peso.
		Conductividad térmica muy elevada	Integración de tubos de calor con platos bipolares.
Flujo de aire	Canales de refrigeración separados	Potencia parasita baja	
		Sistema simple	Compensación entre funcionamiento de refrigeración y potencia parasita
Flujo líquido	Configuración de canales y optimización geometría	Fuerte capacidad de refrigeración	Tamaño de radiación
		Control flexible de la capacidad de refrigeración	Degradación del refrigerante
		Simultaneidad de refrigeración-humidificación interna	Control dinámico del rango de agua evaporada
Cambio de fase	Enfriamiento por evaporación	Sistema simplificado	Masa térmica de agua líquida en el arranque en frío
		Eliminación de bombas de refrigerante	Desarrollo de medios de trabajo idóneos
	Enfriamiento por ebullición	Sistema simplificado	Inestabilidad de las dos fases del fluido

4. Optimización del sistema de refrigeración de la pila PEM.

Así como se detalla en el apartado 2.1, el objetivo del presente proyecto es el de realizar un estudio de los diferentes sistemas y estrategias de refrigeración para las pilas de combustible con membrana de intercambio de protones a altas temperaturas (HT-PEMFC) y, en concreto, optimizar la pila de combustible que se dispone en el laboratorio IRI (Instituto de Robótica e Informática Industrial) de la facultad de Matemáticas y estadística de la UPC (FME).

El diseño y la fabricación de la pila de combustible en la que se va a centrar el estudio del sistema de refrigeración es del centro de Hidrógeno y pilas de combustible “Zentrum für Brennstoffzellen Technik” (ZBT), ubicado en Duisburgo, Alemania. El instituto proporciona soporte al sector industrial para potenciar el mercado e introducir las novedosas tecnologías de pilas de combustible e hidrogeno, en la que se centran sus estudios.

A continuación se exponen las principales características de la pila de combustible disponible y los cálculos y simulaciones de los diferentes sistemas de refrigeración utilizados para el estudio del proyecto.

4.1. Características principales de la pila del fabricante ZBT.

La pila de combustible con membrana de intercambio de protones de alta temperatura (HT-PEMFC) del fabricante ZBT consiste en 12 celdas y ha sido diseñada para proporcionar 120W de potencia eléctrica. Estas 12 celdas que constituyen la pila HT-PEMFC están conectadas en serie y están separadas por placas bipolares de grafito, en concreto, dispone de 13 placas bipolares y aletas refrigerantes.

4.1.1. Módulo de la pila de combustible

La fabricación de la pila de combustible HT-PEMFC se ha realizado de manera compacta, de fácil inicio de funcionamiento con 12 celdas.

La configuración de la conexión del gas se muestra en la figura **Figura 4.1**. Esta configuración puede modificarse o cerrar los colectores con conectores metálicos.

La pila dispone de 2 entradas de alimentación de gas (ánodo y cátodo) y otras dos salidas de para el ánodo y el cátodo.

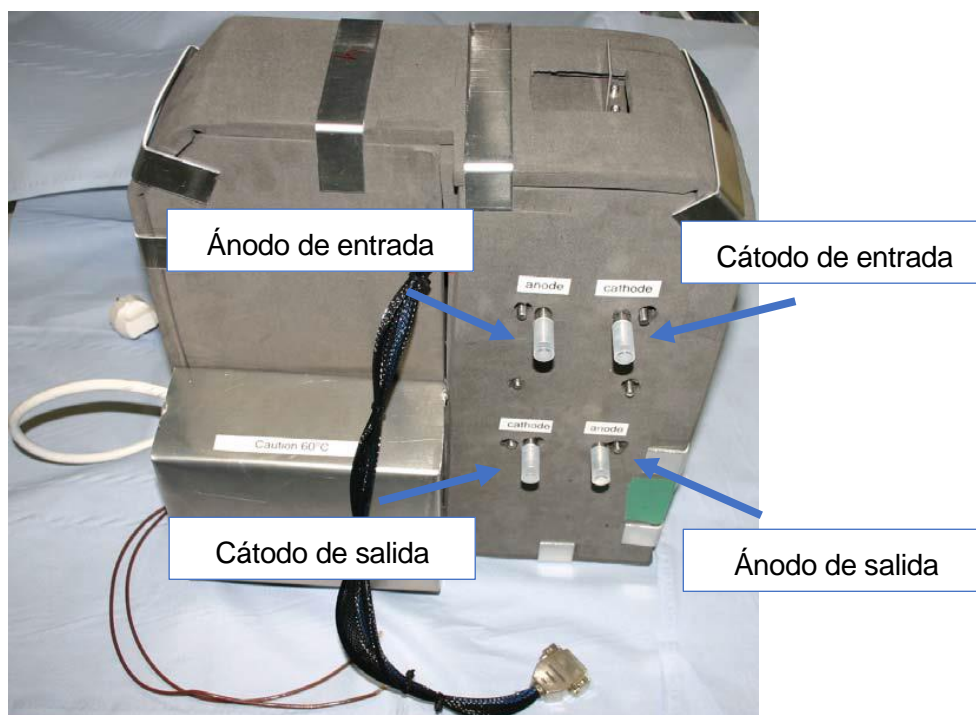


Figura 4.1. Pila de combustible y carcasa vista desde el lado del ánodo. *Fuente: A. Heinzl, Users Manual. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTHT: 2012*

4.1.2. Pila de combustible

En la Figura 4.2 se muestra la pila vista desde la parte superior. Como se ha descrito anteriormente, la pila dispone de 12 celdas conectadas en serie, cuyas celdas están separadas por platos bipolares de materiales basados en grafito. La pila la constituyen 13 platos bipolares incluyendo aletas de refrigeración montadas de manera alterna. El colector de corriente está fabricado de cobre chapado en oro.

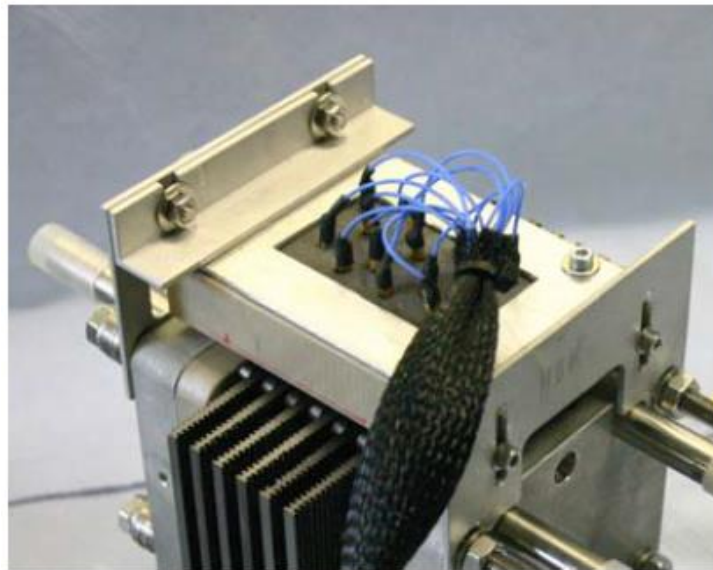


Figura 4.2. Pila de combustible vista desde la parte superior. Fuente: A. Heinzl, *Users Manual. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells)*. ZBTH: 2012

4.1.3. Control de temperatura

Para iniciar el funcionamiento de la pila de combustible, es necesario que esta se caliente a un mínimo de 140 °C. Para poder alcanzar esta temperatura la pila dispone de un serpentín de calefacción y un ventilador de recirculación de aire. El serpentín de calefacción debe conectarse a una fuente de alimentación de corriente continua con una tensión máxima de 48 voltios (V). Por otra parte, el ventilador debe estar conectado a una fuente de alimentación de 230 voltios de corriente alterna (VCA) y debe de estar siempre encendido para evitar gradientes térmicos considerables que pudieran causar daños en las celdas de la pila.

Los materiales de la pila no pueden alcanzar los 180°C ya que podrían causar daños estructurales que perjudicarían el óptimo funcionamiento de la pila. Por este motivo la temperatura interna debe ser monitorizada en todo momento para evitar un exceso de temperatura.

Para reducir la tensión mecánica de los módulos de la pila es necesario que no se sobrepasen los gradientes de temperatura de los componentes ($2,5 \text{ K} \cdot \text{minuto}^{-1}$), ya que podría causar daños en la estructura de la pila.

El diseño del aislamiento de la pila incluye dos ventanas de enfriamiento separadas en las partes superior y posterior. Las ventanas de refrigeración permiten la entrada de aire a temperatura ambiente y su salida una vez realizado el proceso de refrigeración. Cuando las ventanas están cerradas, el aire interior circula del ventilador a la pila recursivamente habiendo una recirculación total. Cuando las ventanas están abiertas, dado que la apertura

para la recirculación sigue abierta, parte del aire sigue recirculando. Sin embargo, se asume que el caudal volumétrico de aire recirculado con ventanas abiertas es pequeño.

Con ventanas cerradas la pila puede trabajar a un máximo de 18A y con ventanas abiertas hasta los 26A. Se produciría un sobrecalentamiento en caso de superar tales valores límite.



Figura 4.3. Pila de combustible vista desde la parte trasera. Fuente: A. Heinzl, Users Manual. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTHT: 2012

Para poner en funcionamiento la pila es necesario alimentar la resistencia calefactora en forma de serpentín a 40V en corriente continua durante aproximadamente 45 minutos.

4.1.4. Comportamiento eléctrico

El voltaje de circuito abierto (OCV) es de aproximadamente 11 voltios. Es recomendable que el voltaje individual de cada celda no sea menor de 0,4 voltios mientras la pila esté en funcionamiento.

La pila no debe de estar en modo OCV durante más de dos minutos si el voltaje se encuentra por encima de los 10 voltios.

4.1.5. Curva polarización de la pila de combustible HT-PEMFC de ZBT

En el manual de funcionamiento de la pila se detallan las gráficas realizadas durante el test

de funcionamiento. En la Figura 4.4 y en la Figura 4.5 se muestran las curvas de polarización de la pila del fabricante. Las curvas de polarización, de las que se ha descrito su uso en el apartado “3.1. Descripción de las pilas de combustible.”, son gráficas V-I que muestran el efecto de todas las pérdidas irreversibles que se producen en una pila de combustible.

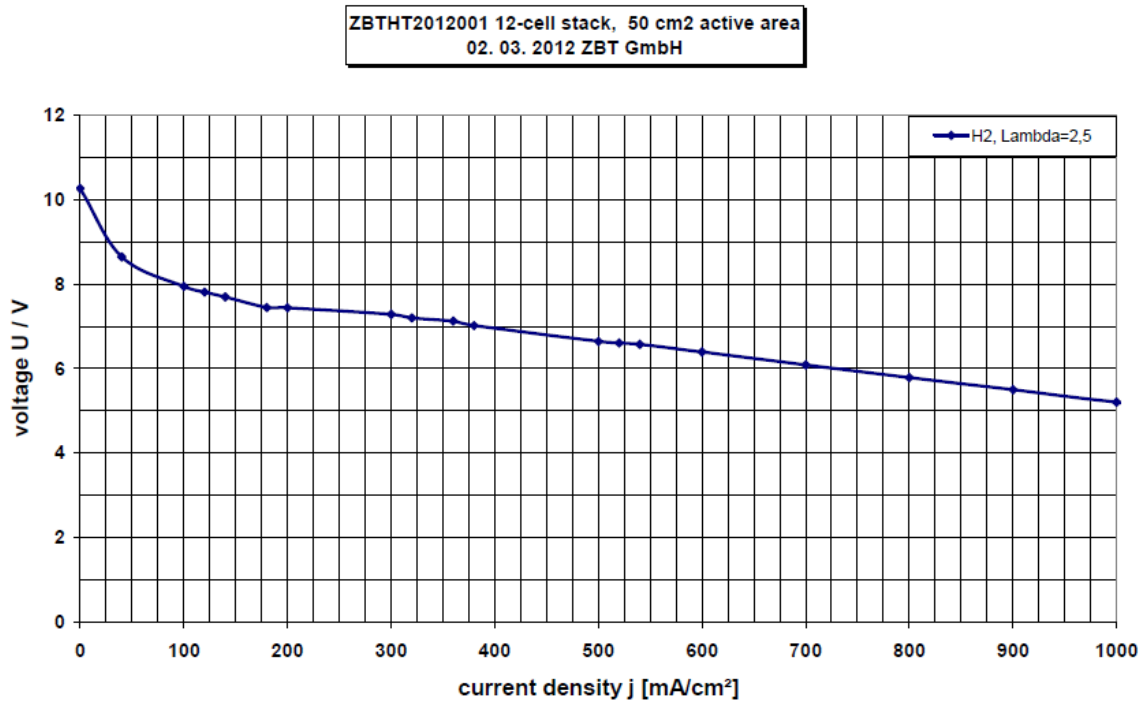


Figura 4.4. Curva de polarización (j-V) de la pila de 12 celdas. Fuente: A. Heinzl, Users Manual. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTH2012

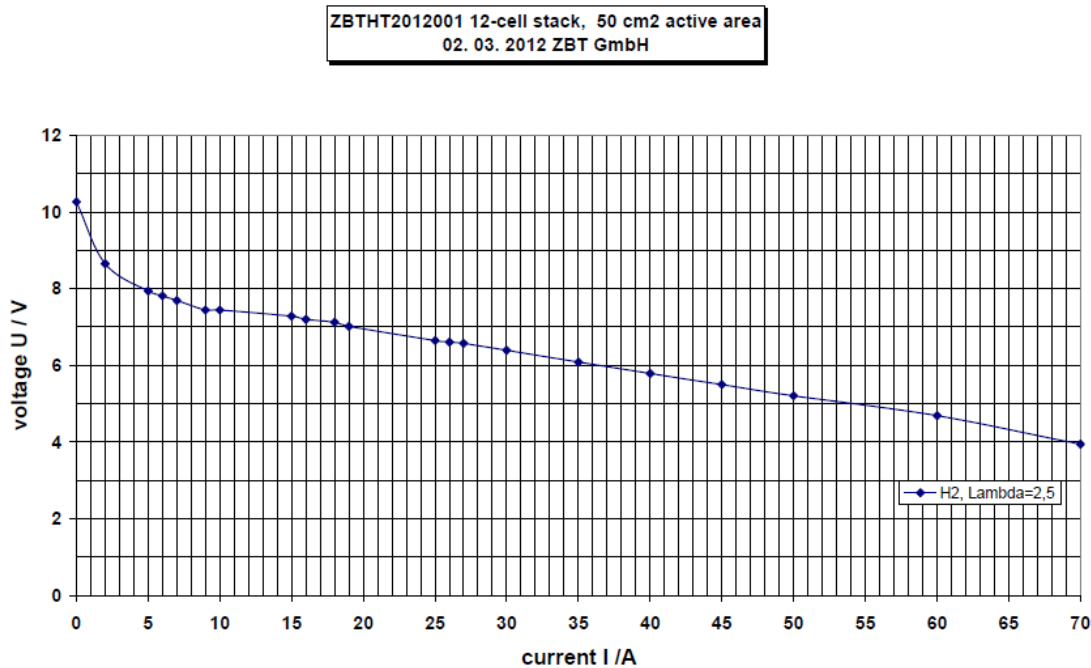


Figura 4.5. Curva de polarización (I-V) de la pila de 12 celdas. Fuente: A. Heinzl, Users Manual. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells). ZBTHT: 2012

4.2. Estudio de los diferentes sistemas de refrigeración disponibles

Una vez descritas las características principales de la pila de combustible del estudio, es posible determinar qué sistema de refrigeración, de los descritos en el apartado 3.2. “Sistemas de refrigeración pilas de combustible tipo PEM”, es el más adecuado para que la pila de combustible alcance los niveles de temperatura óptimos para mejorar su eficiencia.

En la Tabla 5 se identifican los inconvenientes y ventajas de los diferentes sistemas de refrigeración aplicados a nuestra pila de combustible. En la columna “Puntuación” se puntúa el sistema de refrigeración y su aplicabilidad a la pila.

A continuación se detallan las características evaluadas en cada uno de los sistemas de refrigeración y su influencia en la pila del estudio:

- **Dimensión:** Se evalúa la dimensión del sistema de refrigeración para que sea eficiente en relación con las dimensiones de la pila.
- **Eficiencia:** La eficiencia del sistema de refrigeración ajustado a las necesidades de la

pila de combustible. Se han tenido en cuenta los parámetros de potencia generada por la pila y calor generado.

- Precio: el coste de los materiales, instalación y diseño del sistema de refrigeración. Si la inversión económica necesaria para la implementación es baja, la puntuación dada será un número mayor. En caso contrario, el valor dado será inferior.
- Desarrollo tecnológico: Si el desarrollo de la tecnología está actualmente en el mercado, la puntuación dada será la máxima posible. Si se trata de una tecnología todavía en fase de desarrollo, la puntuación será la mínima posible.
- Simplicidad: Dado las dimensiones de la pila son pequeñas, se dará prioridad a las instalaciones que no requieran grandes modificaciones. Por este motivo, las altas puntuaciones serán para los sistemas muy simples de instalación, al contrario de los sistemas más complejos.

Los valores utilizados en la tabla para evaluar las características de los sistemas de refrigeración son: 1, 3, 5, 7, 10. Los valores más bajos serán para las características que no se adaptan a nuestra pila. Los valores más altos son para los sistemas que mejor se adaptan a la pila.

	Tecnología	Dimensión	Eficiencia	Precio	Desarrollo tecnología	Simplicidad	PUNTUACIÓN
Difusores de calor	Materiales de conductividad térmica	10	10	7	7	10	44
	Tubos de calor	5	10	3	10	10	38
Flujo aire	Canales de refrigeración	7	7	10	7	10	41
Flujo líquido	Optimización geometría	5	10	5	5	5	30
Cambio de fase	Enfriamiento por evaporación	5	5	5	5	10	30
	Enfriamiento por ebullición	10	10	5	3	10	38

Tabla 5. Evaluación de los sistemas de refrigeración para la pila de combustible del estudio.

En los resultados de la evaluación de los sistemas de refrigeración, el que más se adapta a las necesidades de la pila son “materiales de conductividad térmica” y “Canales de refrigeración” por flujo de aire. Actualmente la pila ya dispone de materiales con una conductividad térmica elevada, por lo que no es necesario aplicarlos. En los siguientes apartados se estudiará que sistema de refrigeración por flujo de aire es el que mejor se adapta a las necesidades.

4.3. Modelización de los sistemas de refrigeración. (Cálculos)

Dadas las características de nuestra pila de combustible de alta temperatura PEMFC y la evaluación de los diferentes sistemas de refrigeración disponibles, se ha optado por integrar un sistema de refrigeración por flujo de aire al dispositivo. Para ellos, es necesario realizar un estudio matemático para poder determinar que cantidad de flujo de aire es necesario que refrigere la pila, y así poder determinar que elemento se debe integrar en la pila para que alcance los valores de generación eléctrica dispuestos por el fabricante y logre una mayor eficiencia del sistema.

Para realizar el estudio matemático se han utilizado resultados de pruebas realizadas por el proveedor de la pila y por otros estudios empíricos sobre nuestra pila de combustible. A continuación se desarrollaran los cálculos previos y los datos desde los que se inicia este estudio. En los siguientes apartados del proyecto se mostrará el desarrollo de los cálculos para llegar a una solución a la problemática identificada al inicio del proyecto.

Todos los parámetros utilizados en los siguientes apartados están definidos en el apartado 1. *Glosario*.

4.3.1. Datos iniciales

Para desarrollar el estudio matemático del sistema de refrigeración es necesario disponer de algunos datos iniciales, como son:

- Especificaciones del entorno (densidad del aire, temperatura, presión)
- Características de la pila (número de aletas, dimensiones, curva de polarización, masa de la pila)
- Características de los sistemas de refrigeración ya existentes (flujo del aire ventiladora, salto térmico, etc)
- Características de la resistencia de la pila (Voltaje, intensidad, resistencia)

Inicialmente se han identificado las condiciones en las que se encuentra el laboratorio. Para la realización de los cálculos ha sido necesario realizar una aproximación de la temperatura y presión a las condiciones normales (25°C, 1 atm). De esta manera es posible utilizar valores de densidad del aire y principios de termodinámica de gas ideal, simplificando así los cálculos realizados. Los valores reales del laboratorio se asemejan bastante, por lo que el error entre los cálculos matemáticos y los valores reales puede menospreciarse.

Datos iniciales entorno de la pila				
	Parámetro	Nomenclatura	Valor	Magnitud
Características aire	Densidad	ρ_a	1,1846	[kg/m ³]
	Calor específico	c_{pa}	1012	[J/kg*K]
Condiciones normales aire	Temperatura ambiente	T_{amb}	25	[°C]
	Presión	P_{amb}	1	[atm]

Tabla 6: Valores del entorno de la pila de combustible PEMFC

Una vez identificados los valores del entorno de la pila, es necesario conocer los parámetros de nuestro dispositivo y sus componentes. En la Tabla 7 se identifican las dimensiones de la pila de combustible, así como la de las aletas que permiten la transferencia de calor al exterior de la pila.

Dimensiones de la pila				
	Parámetro	Nomenclatura	Valor	Magnitud
Pila PEMFC	Número de celdas	n_{celdas}	12	-
Aletas	Separación entre aletas	S_{e_a}	0,4	[cm ²]
	Altura aleta	H_{ala}	12	[cm]
	Anchura aleta	A_{al}	3,5	[cm]
	Grosor aleta	B_{al}	0,3	[cm]
	Número aletas	n_{al}	13	-

Tabla 7. Dimensiones de la pila.

Características de los componentes de la pila				
	Parámetro	Nomenclatura	Valor	Magnitud
Ventilador	Salto térmico	$S_{térmico}$	2,59	[°C]

Resistencia	Intensidad (I_r)	I_{res}	4,94	[A]
	Voltaje	V_{res}	40	[V]
	Resistencia	R_{res}	8,108	[ohm]

Tabla 8. Características de los componentes de la pila

Las características de los componentes de la pila han sido identificadas en la Tabla 8. Los principales componentes son el ventilador que permite el flujo de aire en la pila y la resistencia eléctrica que genera calor para alcanzar la temperatura óptima para la generación de electricidad de la pila.

4.3.2. Cálculos previos

Una vez identificados los valores de partida del estudio, es necesario realizar una serie de cálculos previos para determinar los parámetros termodinámicos de la pila. Para ello, calculamos el flujo de masa de aire de la refrigeración necesario para trabajar a una Intensidad de 60 A sin que la pila supere los 160°C.

Antes de iniciar los cálculos se imponen tres hipótesis para el desarrollo del estudio.

Hipótesis:

- Se supone un 10% de pérdidas (p) del calor generado a través de las paredes laterales.
- Condiciones normales de trabajo para el aire de entrada (Ver Tabla 6).
- Capacidad de convección máxima ideal. Es decir, la temperatura del aire que sale de la carcasa que envuelve la pila es igual a la temperatura que alcanza la pila (160 °C (T_{out})).

Una vez definidas las hipótesis del estudio, se procede a la resolución de los cálculos. Dado que se quiere trabajar a una intensidad de la pila máxima ($I_{pila} = 60$ A) el voltaje de la pila (U_{pila}) será de 4,7 Volts. Esta relación de Intensidad – Voltaje se determina mediante la curva de polarización específica de la pila descrita en el apartado 4.1.5. A partir de esta información y de los datos de la pila (ver Tabla 8), podemos iniciar los cálculos:

$$V_{celda} = \frac{U_{pila}}{n_{celdas}} = \frac{4,7}{12} = 0,39167 \text{ Volts} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$P_e = I_{pila} \times U_{pila} = 282 \text{ Watts} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$Q_{generado} = P_e \times \left(\frac{1,25}{n_{celdas}} - 1 \right) = 282 \times \left(\frac{1,25}{12} - 1 \right) = 617,99234 \text{ Watts} \quad (\text{Ec. 17})$$

En la ecuación 15 se calcula el diferencial de voltaje que hay entre cada celda. A partir de los valores obtenidos de la curva de polarización (I_{pila} y U_{pila}) se obtiene la potencia eléctrica generada por la pila (ecuación 16) para realizar el cálculo del calor que genera la pila en su interior ($Q_{generado}$) (Ecuación 17). Una vez obtenemos estos resultados, es posible calcular la cantidad de flujo másico necesario para liberar todo el calor excedente de la pila. Para ello, se debe utilizar la ecuación descrita en la ecuación 18. Se debe tener en cuenta, según la hipótesis establecida al inicio, que la pila tiene aproximadamente un 10% de pérdidas por las paredes laterales. Este factor se debe tener en cuenta para el cálculo del flujo másico del aire (ecuación 19).

$$Q_{generado} = \dot{m}_{aire} \times cp_{aire} \times \Delta T \quad (\text{Ec. 18})$$

$$\dot{m}_a = \frac{Q_{generado}}{cp_a \times \Delta T} = \frac{Q_{generado} \times (1 - p)}{cp_a \times (T_{out} - T_{amb})} = \frac{617,992 \times (1 - 0,1)}{1012 \times (160 - 25)} = 4,07 \times 10^{-3} \frac{Kg}{s} \quad (\text{Ec.19})$$

Una vez calculado el flujo másico del aire, calculamos el caudal volumétrico de aire (Q_{a_in}) que debe entrar en la pila para alcanzar los parámetros establecidos (Ecuación 20):

$$\dot{Q}_{a_in} = \dot{m}_{aire} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ aire}}{1,1846 \text{ Kg aire}} \times \frac{1000 \text{ litros aire}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} = 206,14 \frac{\text{litros}}{\text{min}} \quad (\text{Ec. 20})$$

Este valor nos es de utilidad para empezar la iteración del estudio del flujo de aire de entrada en la pila.

Antes de iniciar las iteraciones matemáticas es necesario realizar los cálculos de las superficies por las que circula el flujo de aire. Dadas las características de las aletas definidas en la Tabla 7 se calcula el área total (A_t). En la ecuación 21 se calcula la superficie que existe en la pila con aletas (S_{c_a}), mientras que en la ecuación 22 se calcula la superficie sin aletas (S_{s_a}). La suma de las superficies da como resultado el Area total (A_t) (Ec.23).

$$S_{c_a} = n_{al} \cdot [H_{al} \cdot A_{al} \cdot 2 + B_{al} \cdot H_{al}] = 13 \cdot [12 \cdot 3,5 \cdot 2 + 0,3 \cdot 12] = 1138,8 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec. 21})$$

$$S_{s_a} = H_{al} \cdot S_{e_a} \cdot (n_{al} - 1) = 12 \cdot 0,4 \cdot (12 - 1) = 52,8 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec.22})$$

$$A_t = S_{c_a} + S_{s_a} = 1138,8 + 52,8 = 1191,6 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec.23})$$

4.3.2.1. Análisis de parámetros constantes (h_a , k_p , $m_p c_{p_p}$)

Una vez calculados los parámetros iniciales para empezar las iteraciones matemáticas, es necesario encontrar los valores de los parámetros termodinámicos de la pila. Existen tres parámetros que varían sus valores dependiendo de la temperatura en la que trabaja la pila de combustible:

- Coeficiente de convección del aire (h_a)
- Coeficiente de pérdidas de la pila (k_p)
- Masa específica de la pila por su calor específico ($m_p c_{p_p}$)

Dada la complejidad de trabajar con parámetros variables, se ha aplicado la hipótesis de que los tres parámetros se mantienen constantes durante todo el proceso de generación de electricidad de la pila. Dada la importancia de estos parámetros a continuación se detallan las características y los rangos de valores en los que se encuentran:

Coeficiente de convección del aire (h_a)

El coeficiente de convección es un parámetro que varía según varias variables como son la geometría por donde circula el fluido, el estado de las superficies, las propiedades del flujo, la temperatura, la velocidad del fluido, etc. Por otra parte, el coeficiente de convección no es uniforme en todo el fluido, siendo así un parámetro muy complejo y difícil de calcular. El coeficiente de convección en sí es un valor promedio en la superficie.

Además, la complejidad de la geometría de las aletas de la pila por donde circula el aire no permite el cálculo de dicho coeficiente de manera teórica, ya que existen gradientes de temperatura horizontal y verticalmente a lo largo de las aletas, sin tener en cuenta el desgaste de estas. Por este motivo, mediante un cálculo empírico realizado en un estudio de la pila, se obtiene el coeficiente de convección.

El rango de valores del coeficiente de convección forzada es de 15 y 300 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Coeficiente de pérdidas de la pila (k_p)

La constante de pérdidas es un valor importante que se encuentra en la ecuación 2724 para el cálculo de las pérdidas de calor. Dicho parámetro representa la pérdida de potencia calorífica que pierde la pila y que posteriormente se pierde por las paredes laterales.

A continuación se desarrollan las ecuaciones del primer principio de Fourier para una pared plana hasta llegar a nuestra ecuación final. En la ecuación 24 se expone la primera ley de Fourier. Haciendo una equivalencia eléctrica, se concluye que la potencia es equivalente a la intensidad, la diferencia de temperaturas a la diferencia de potencial y el término que nos queda es equivalente a la resistencia. Con estas equivalencias se obtiene la ecuación 25. Sabiendo que la resistividad (R) es la inversa de la conductividad (k), podemos definir la ecuación 26. Para adaptar esta ecuación a nuestro sistema y, dado que no tenemos los valores de las temperaturas de la pared interior ni la exterior, se sustituyen estos parámetros por la Temperatura de la pila (T_p) y la Temperatura ambiente (T_{amb}), respectivamente (ecuación 27).

$$\dot{Q} = \frac{(T_{interior_{pared}} - T_{exterior_{pared}})}{\frac{longitud\ de\ la\ pared}{conductividad\ del\ material \cdot area}} \quad (Ec. 24)$$

$$\dot{Q} = \frac{(T_{interior_{pared}} - T_{exterior_{pared}})}{R} \quad (Ec. 25)$$

$$Q_{pérdidas} = k \cdot (T_{interior_{pared}} - T_{exterior_{pared}}) \quad (Ec. 26)$$

$$Q_{pérdidas} = k_p \cdot (T_p - T_{amb}) \quad (Ec. 27)$$

Como se puede observar en las ecuaciones anteriores, el coeficiente de pérdidas es un parámetro constante que depende de la longitud de la pared, conductividad del material y el área. Por este motivo es posible mantenerlo constante en la iteración.

El rango de valores del coeficiente de pérdidas es de 0,7 y 3 W·K⁻¹.

Masa específica de la pila por su calor específico ($m_p c_{p,p}$)

La masa de la pila es un valor contante a lo largo del proceso y la capacidad calorífica se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de un sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. En general, el calor específico depende del valor de la temperatura inicial, por lo que se puede suponer constante a lo largo del proceso.

El rango de valores de la masa específica por su calor específico es de 2500 y 4000 J·K⁻¹.

4.3.2.2. Valores de los parámetros h_a , k_p , $m_p c_{p_p}$.

Una vez analizados los tres parámetros se llega a la conclusión de que los únicos valores que se pueden considerar constantes son el coeficiente de pérdidas (k_p) y la masa específica de la pila ($m_p c_{p_p}$). Por el contrario, no se puede considerar un valor constante el coeficiente de convección (h_a), sino que depende de la intensidad de la pila.

El resultado de estos tres valores se ha extraído de las conclusiones de las pruebas empíricas realizadas en la pila en otro proyecto. La metodología de ajuste de estos tres parámetros se realizó con la ayuda de las curvas de calentamiento de la pila de combustible, en la que se monitorizaron las temperaturas del aire de entrada a la pila y la temperatura de la pila en dos experimentos realizados. El proceso que se siguió para determinar los tres parámetros fue mediante un proceso iterativo partiendo de unos valores iniciales. Se realizaron las iteraciones hasta llegar a un ajuste entre la dinámica y la estática de las curvas de calentamiento simuladas tanto en la pila como la del aire de entrada. Los resultados de los ajustes se pueden observar en la Tabla 9. *Resultados obtenidos de los parámetros h_a , k_p y $m_p c_{p_p}$.*

Parámetro	Nomenclatura	Magnitud	Rango	Resultado
Coeficiente de convección del aire	h_a	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	$[15 - 300]$	20
Coeficiente de pérdidas de la pila	k_p	$[W \cdot K^{-1}]$	$[0,7 - 3]$	0,9
Masa específica por calor específico pila	$m_p c_{p_p}$	$[J \cdot K^{-1}]$	$[2500 - 4000]$	2800

Tabla 9. Resultados obtenidos de los parámetros h_a , k_p y $m_p c_{p_p}$.

4.3.3. Modelo matemático del sistema de refrigeración

Previo a la modelización matemática es necesario definir las ecuaciones y el comportamiento de la transferencia de calor de la pila de combustible. Consideraremos la pila de combustible como una “caja negra” de la que absorbe y libera energía calorífica. De esta manera se puede

definir un balance de energía y, de esta manera, poder optimizar el sistema. Las energías que intervienen en el sistema son las siguientes:

- Energía generada por la pila de combustible (Q_{gen})
- Energía liberada por convección de las aletas (Q_{conv})
- Energía generada por la resistencia eléctrica (Q_{res})
- Energía liberada debido a las pérdidas de la pila (Q_{per})

Las energías del sistema definidas anteriormente se pueden clasificar como energía generada y energía liberada por la pila. En la Figura 4.6 se define el flujo de entrada y salida de dichas energías en el sistema.

Como se puede observar en la imagen, las únicas energías que producen calor en el sistema de control proceden de la resistencia eléctrica y la pila de combustible, mientras que las energías que se liberan del sistema proceden de la geometría i estructura de las aletas y de las pérdidas por la estructura externa de la pila.

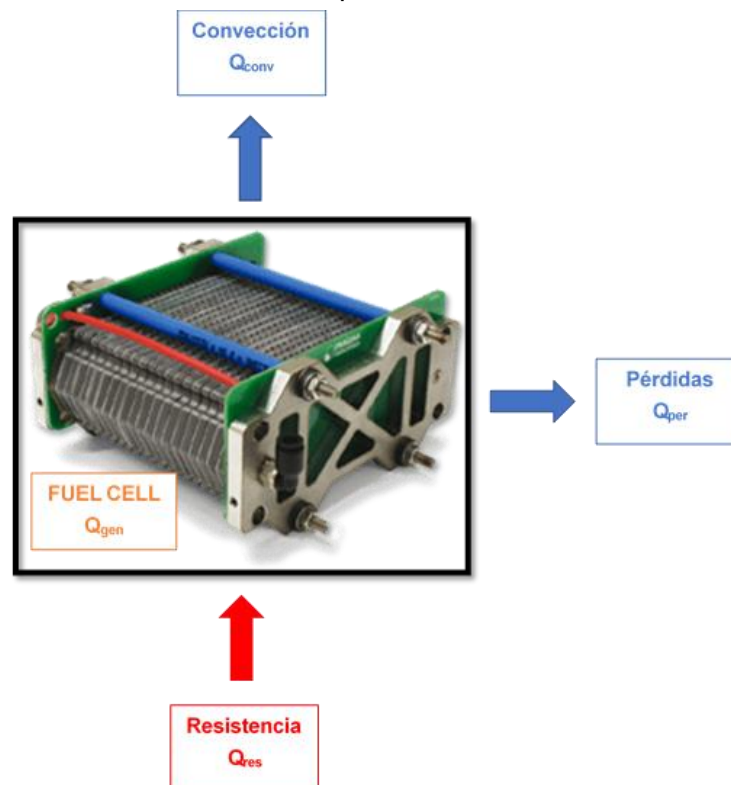


Figura 4.6. Balance de energía de la pila de combustible.

Una vez definido el balance de energías en el sistema de control es necesario definir las condiciones que se suponen que cumple la pila de combustible. Dichas hipótesis son:

- Temperatura uniforme de la pila
- Diferencia de temperaturas efectiva entre el aire y la pila: Diferencia de temperatura media logarítmica (MLDT)
- Coeficiente de convección constante durante la simulación

Si transformamos el balance de energía en ecuaciones el resultado es:

$$m_p \cdot cp_p \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{gen} + Q_{res} - Q_{conv} - Q_{perd} \quad (\text{Ec. 28})$$

Desarrollando la ecuación 28 obtenemos la siguiente ecuación:

$$m_p cp_p \cdot \frac{dT}{dt} = I_p V_p \cdot \left(\frac{1,25}{n_{celdas}} - 1 \right) + I_R V_R - hA \Delta T_{MLDT} - k_p (T_p - T_{amb}) \quad (\text{Ec. 29})$$

Una vez desarrolladas las ecuaciones del balance de energía se ha observado que el calor generado por la resistencia no es un calor que afecte directamente a la pila, si no que afecta al aire de entrada al sistema. Por este motivo, esta energía se tiene en cuenta en el desarrollo de la ecuación de la media logarítmica de la temperatura de la energía de convección. Reformulando las ecuaciones obtenemos:

$$m_p \cdot cp_p \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{gen} + \cancel{Q_{res}} - Q_{conv} - Q_{perd} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$m_p cp_p \cdot \frac{dT}{dt} = I_p V_p \cdot \left(\frac{1,25}{n_{celdas}} - 1 \right) + \cancel{I_R V_R} - hA \Delta T_{MLDT} - k_p (T_p - T_{amb}) \quad (\text{Ec. 31})$$

De esta manera, el parámetro ΔT_{MLDT} se reformula de la siguiente manera:

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{T_{aF} - T_{aI}}{\ln \left(\frac{T_p - T_{aI}}{T_p - T_{aF}} \right)} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$T_{aF} = T_p - (T_{aI} - T_p) \cdot \exp \left(\frac{-hA}{\dot{m}_a cp_a} \right) \quad (\text{Ec. 33})$$

$$T_{aI} = T_{amb} - T_{salto} + \Delta T \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde en el parámetro ΔT se tiene en cuenta el calor generado por la resistencia al aire:

$$\Delta T = \frac{Q_{res}}{\dot{m}_a cp_a} \quad (\text{Ec. 35})$$

La ecuación 32 procede de la media logarítmica de la temperatura en un sistema de flujo para determinar la fuerza que impulsa la transferencia de calor. Es un método en el que se analiza la temperatura del fluido frío y del fluido caliente. En nuestro caso, se considera que la temperatura de la pila se mantiene constante (T_p) mientras que la temperatura del aire calentando hasta llegar a valores próximos de la pila (T_{ai} y T_{af}). En la siguiente figura se muestra el diagrama de temperaturas.

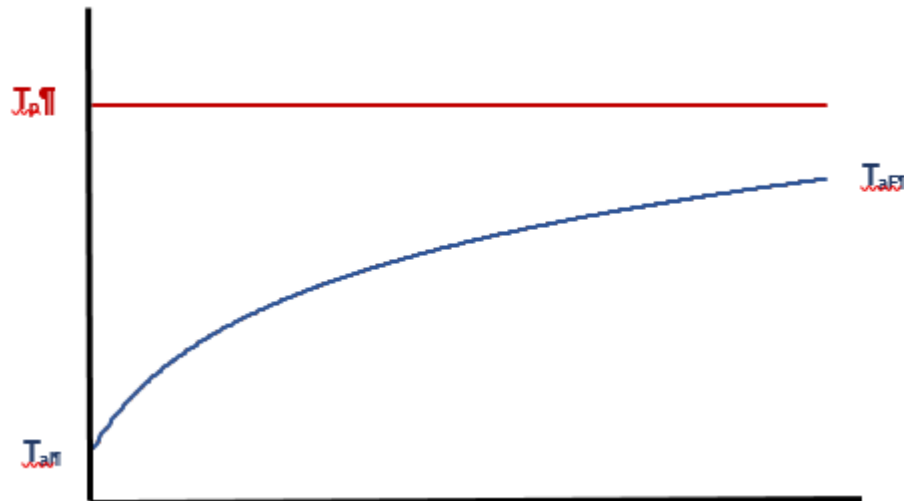


Figura 4.7. Gráfico del cálculo de la media logarítmica de la temperatura ΔT_{MLDT}

Teniendo en cuenta el desarrollo de las ecuaciones del balance de energía y los parámetros fijados de h_a , k_p y $m_p c_{p,p}$ en la Tabla 9 y que la temperatura máxima de la pila es de 160°C (máxima eficiencia), se obtienen los siguientes valores:

Tabla 10. Resultados de los cálculos iniciales de la pila de combustible

RESULTADOS INICIALES DE LA PILA DE COMBUSTIBLE					
1. Parámetros de la pila					
h_a [W·m ⁻²]	20	k_p [W·K ⁻¹]	0,9	$m_p c_{p_p}$ [J·K ⁻¹]	2800
2. Temperaturas calculadas					
T_p [K]	433,15	T_{ai} [K]	348,63	T_{af} [K]	389,27
3. Caudal de aire en la pila					
m_{ai} [kg·s ⁻¹]	0,00407		Q_{ai} [l·min ⁻¹]	206,20	
4. Energía recibida/ emitida del sistema de control					
Q_{gen} [W]	618		Q_{conv} [W]	144,58	
Q_{res} [W]	197,33		Q_{perd} [W]	121,5	
5. Energía total en el sistema de control (Q_t) ($Q_t = Q_{gen} - Q_{conv} - Q_{perd}$)					
Q_t [W]	351,92				

Con los resultados iniciales que se han obtenido en la Tabla 10, podemos concluir que si se mantiene el actual sistema de refrigeración el equipo no puede funcionar a su máxima eficiencia. A continuación se detallan las conclusiones de esta fase previa:

- El calor total (Q_t) dentro del sistema tiene valor positivo, es decir, la pila aún mantiene calor en su interior. La causa de este problema se debe a que, la energía de convección (Q_{conv}) no es suficientemente elevada como para contrarrestar toda la energía generada en la pila (Q_{gen}) (todo y ser casi la mitad de esta).
- El calor debido a las pérdidas siempre se va a mantener en estos valores (siempre y cuando queramos obtener la máxima eficiencia de la pila (160°C)). Por lo que no puede alcanzar el valor del calor generado en la pila.

Expuestas estas conclusiones se puede observar como la solución para alcanzar los máximos rendimientos de la pila es aumentar la transferencia de calor mediante la convección y mejorar el coeficiente de convección de las aletas de la pila. En el siguiente apartado se va a definir los pasos realizados para crear la optimización del sistema de refrigeración.

4.4. Optimización del sistema de refrigeración

Como se ha explicado en el apartado anterior, para poder optimizar el funcionamiento de la pila de combustible para que trabaje en los parámetros de máximo rendimiento, es necesario mejorar la transferencia de calor del sistema de refrigeración. En el presente apartado, se cuantificarán los parámetros necesarios para ofrecer el máximo rendimiento de la pila.

Para cuantificar estos parámetros se optimizará la ecuación del balance de energía del sistema, en los que algunos parámetros deberán ser modificados para alcanzar la transferencia de calor óptima. Para ello es necesario definir qué parámetros relacionados con la eficiencia termodinámica del equipo deben ser optimizados, dado que no es necesario modificar todos los parámetros de la pila (estructura, materiales...).

4.4.1. Optimización del balance de energía

Tal y como se describe en el apartado 4.3.3 (ecuación 30), el balance de energía del sistema es la ecuación principal para la optimización del sistema de refrigeración de la pila. Las energías relacionadas con la generación de calor (Q_{gen}) por parte de la pila y la liberación de calor debido a las pérdidas (Q_{perd}) son inalterables. En el caso del calor generado por la pila, los parámetros de Resistencia y estructura de la pila no son modificables. En el caso de la

Intensidad, este parámetro es una característica para alcanzar el máximo rendimiento de la pila, por lo que viene fijado. En el caso del calor debido a las pérdidas, la Temperatura ambiente y la constante de la pila son valores característicos del entorno y de la estructura de la pila, respectivamente. Por el contrario, la temperatura de la pila viene fijado dado que se trata la temperatura máxima a la que pila puede funcionar y un valor que favorece el rendimiento máximo del sistema.

Por este motivo, el único parámetro que puede ser modificado en la ecuación del balance de energía es el calor de convección (Q_{conv}). Los parámetros para modificar se detallan a continuación:

- Coeficiente de convección (h)
- Caudal de aire de entrada (Q_{ai})

El parámetro de caudal de aire de entrada (Q_{ai}) viene definido por el flujo másico de aire que entra en el sistema (m_{ai}). Por lo que el parámetro que se debe modificar en la optimización es el flujo másico de aire en la entrada. Cuantificando este valor se podrán definir que equipos de ventilación son óptimos para trabajar. Por otra parte, la cuantificación del coeficiente de convección se debe realizar utilizando una ecuación que relaciona la velocidad del fluido que pasa por las aletas con el coeficiente de convección. Esta aproximación únicamente se puede utilizar para velocidades de fluidos entre 2 y 20 m/s:

$$h = 10,45 - v + (10 * \sqrt{v}) \quad (\text{Ec. 36})$$

$$v = \frac{Q_{ai}}{A_{e_a}} \quad (\text{Ec. 37})$$

Siendo la velocidad un parámetro que se determina mediante el cabal de entrada del aire y el área entre las aletas (ec. 37).

Para la optimización del sistema de refrigeración se ha utilizado el programa EXCEL para realizar la iteración de los parámetros. Para ellos se han definido una serie de restricciones y objetivos de los que a continuación se detallan:

- Optimización de la ecuación del balance de energía, estableciendo como objetivo un resultado igual a 0: $\frac{dT}{dt} = 0$.
- Se iterarán los parámetros del **flujo másico de aire de entrada (m_{ai})** y la **Temperatura de la pila (T_p)**.

- La temperatura de la pila (T_p) debe ser superior a la temperatura de entrada del aire (T_{ai}):
 $T_p > 300 \text{ K}$
- La velocidad del aire entre las aletas debe ser un valor comprendido entre 2 y 20 m/s: **$2 \leq v \leq 20$**
- La media logarítmica de la temperatura ΔT_{MLDT} debe ser superior a cero: **$\Delta T_{MLDT} > 0 \text{ K}$**

Una vez definidos el objetivo, las restricciones y los valores a modificar para la iteración de las ecuaciones, únicamente es necesario iniciar la iteración.

En el siguiente apartado se detallan los resultados obtenidos y propuestas para solventar la problemática.

4.4.2. Resultados y conclusiones de la optimización

Teniendo en cuenta las restricciones y objetivo de la iteración explicada en el apartado anterior, se ha realizado la iteración de la ecuación del balance de energía para obtener una solución óptima a la problemática propuesta en este proyecto. Los resultados son los siguientes:

Tabla 11. Resultados de la optimización del sistema de refrigeración

RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN					
1. Parámetros de la pila					
h_a [W·m ⁻²]	35,15	k_p [W·K ⁻¹]	0,9	$m_p c_{p_p}$ [J·K ⁻¹]	2800
2. Temperaturas calculadas					
T_p [K]	434	T_{ai} [K]	306,14	T_{af} [K]	319,70
3. Caudal de aire en la pila					
m_{ai} [kg·s ⁻¹]	0,036		Q_{ai} [m ³ ·h ⁻¹]	109,77	
4. Energía recibida/ emitida del sistema de control					
Q_{gen} [W]	618		Q_{conv} [W]	495,73	
Q_{res} [W]	197,33		Q_{perd} [W]	122,26	
5. Energía total en el sistema de control (Q_t) ($Q_t = Q_{gen} - Q_{conv} - Q_{perd}$)					
Q_t [W]	0				

Para facilitar la visualización de los cambios entre los resultados del cálculo inicial (ver Tabla 10) y el resultado final tras la optimización del sistema, se han destacado en color verde todos

aquellos valores que han sufrido cambios. A continuación se detallan los cambios más relevantes para nuestro sistema:

- **El flujo másico de aire (m_{ai})** ha aumentado casi 9 veces más que en los cálculos preliminares a la optimización. En consecuencia, aumenta el caudal de aire en la entrada del sistema (Q_{ai}).
- **El Coeficiente de convección (h_a)** ha sufrido un aumento pasando de un valor de 20 a 35,15 W·K⁻¹·m⁻². Este cambio viene afectado por el aumento de la velocidad en la que el aire pasa entre las aletas. Este incremento viene influenciado por el aumento del caudal de aire que entra en el sistema (Q_{ai})
- Otro de los valores que ha aumentado es el **Calor liberado por convección (Q_{conv})**. La razón del aumento de este factor es el aumento del caudal de aire que entra en el sistema. A mayor caudal, mayor coeficiente de convección y, por tanto, mayor liberación de calor por convección.
- A raíz del aumento del calor liberado por convección y, dado que era el objetivo de la iteración, la **energía total del sistema de control (Q_i)** se ha reducido a un valor prácticamente nulo (se considera valor cero).
- La **temperatura del aire de entrada (T_{ai})** ha disminuido debido a que el calor que proporciona la resistencia depende del flujo másico de aire de entrada. Al entrar una mayor cantidad de aire, el calor que proporciona la resistencia al aire es menor a la de los resultados iniciales. En consecuencia, la **temperatura de salida del aire (T_{af})** también es inferior a la de los resultados iniciales.

Con los resultados obtenidos se puede concluir que es necesario un sistema de refrigeración que permita el flujo de aire con los parámetros de caudal de entrada de aire calculados.

4.4.3. Propuesta para el sistema de refrigeración

Según los resultados obtenidos en el apartado anterior, la solución para obtener el máximo rendimiento de la pila de combustible es aumentar el caudal de aire. Para ello es necesario utilizar un ventilador que tenga una capacidad de, al menos, 110 m³·h⁻¹. Se debe tener en cuenta que, los resultados obtenidos son para el rango de funcionamiento máximo de la pila, por lo que no siempre va a trabajar en estos valores.

La solución aportada es la de incluir un ventilador centrífugo en el que se pueda variar el caudal de entrada de aire, ya que los parámetros de funcionamiento pueden variar a lo largo del funcionamiento.

Se han buscado en el mercado diferentes proveedores de ventiladores y, una vez evaluados cada uno de ellos, se ha escogido el proveedor **Airtècnics** por su gran variedad de productos y por tener sus oficinas en Barcelona.

La empresa Airtècnics nos proporciona diferentes soluciones de ventilación. Para la selección del tipo de ventilador que más se adapta a nuestras necesidades, se han definido algunos aspectos que deben cubrir los ventiladores propuestos. Estas características son:

- Bajo nivel sonoro
- Velocidad regulable
- Caudal máximo superior a $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Dimensiones pequeñas

Con estas características se ha escogido el tipo de ventilador centrífugo GER/ GRF. Las características son:

- Motor de rotor externo protegido por temocontacto
- Bajo nivel sonoro
- Velocidad regulable (0-100%)
- Turbinas equilibradas estática y dinámicamente según ISO 1940

Dentro de este tipo de ventilador centrífugo se ha seleccionado el modelo **2GRE15 133/49R** (ver Figura 4.8). Las características del modelo se ajustan a las necesidades de nuestro proyecto (caudal máximo superior a $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y regulable) así como otras características que no son necesarias, pero sí de gran importancia a la hora de trabajar con la pila de combustible (bajo nivel sonoro).

Ventilador centrífugo GRE / GRF Ventiladores centrífugos de pequeño caudal**Características**

- Motor de rotor externo protegido por termocontacto
- Velocidad regulable 0-100%
- Turbinas equilibradas estática y dinámicamente según ISO 1940
- Bajo nivel sonoro
- Versión trifásica bajo demanda

Especificaciones

Modelo	Tensión (V (50 Hz))	Intensidad (A)	Potencia (W)	Velocidad (rpm)	Caudal (m ³ /h)	Presión Máxima (Pa)
2GRE15 133/49R	1x230V	0,33	75	2210	255	330
2GRE15 140/59R	1x230V	0,39	88	1245	340	400
2GRE20 140/59R	1x230V	0,56	125	1540	395	440
2GRE25 140/59R	1x230V	0,78	176	2050	515	450
2GRE35 160/62R	1x230V	0,72	165	1565	465	530
2GRE45 160/62R	1x230V	1,12	253	2110	625	610
2GRE43 120/62R	1x230V	0,27	58	1715	260	280
2GRF65 180/52R	1x230V	1,79	411	2145	685	900
4GRE25 160/62R	1x230V	0,34	70	1280	410	160
4GRE25 180/75R	1x230V	0,4	89	985	530	220
4GRE35 180/75R	1x230V	0,45	102	1155	585	220
4GRE45 200/75R	1x230V	0,87	172	1040	775	280

Figura 4.8. Características del ventilador centrífugo propuesto**4.4.3.1. Aprovechamiento del calor generado.**

En el proceso de generación de electricidad se genera una elevada energía calorífica que puede ser utilizada para otro tipo de aplicaciones. En el caso de nuestra pila de combustible se identifican dos tipos de energías caloríficas: calor perdida por las paredes de la pila y el calor de convección. La energía perdida por los laterales de la pila no puede ser aprovechada, dado que son pérdidas irregulares por todas las paredes de la pila y es difícil poder canalizar para su uso en aplicaciones externas. Por otra parte, el calor de convección, al tratarse de aire caliente, puede ser utilizado en aplicaciones externas a la pila.

En el caso de la pila en la que se basa el estudio, al tratarse de un prototipo, la temperatura del aire y la generación de electricidad generada por la pila no es suficiente como para poder utilizarse como aplicación. En cambio, con un diseño apropiado, podría utilizarse la pila para equipos industriales que utilizan el aire caliente para procesos de fabricación que deben realizarse con calor (calentar, secar, formar, contraer...). El uso de la pila de combustible a modo de cogeneración (energía eléctrica y energía térmica) podría utilizarse para mantener

estabilizada las temperaturas de hornos, precalentar...

Por otra parte, si se quisiera aprovechar el aire caliente a la salida de la pila sería conveniente reducir la cantidad de aire caliente que se pierde por las paredes. De esta manera se acumularía más calor en el interior y se debería extraer mediante el flujo de aire. Si se llevasen a cabo estas mejoras debería recalcular la optimización realizada en el presente proyecto.

5. Resultados de la solución propuesta

5.1. Análisis económico del proyecto TFM

El objeto del proyecto es la optimización del sistema de refrigeración de una pila de combustible utilizada en el departamento IRI de la facultad de Matemáticas y Estadística de la UPC. Para ello, ha sido necesario realizar un estudio de la tecnología de las pilas de combustible para conocer las propiedades y características del proceso de generación de electricidad. Además, se han estudiado los diferentes métodos de refrigeración de las pilas de combustible, realizando una simulación con el sistema de refrigeración óptima para nuestra pila. Con los resultados de la simulación se ha verificado que la solución teórica adoptada es apta para su implementación.

5.1.1. Análisis de costes y elaboración de presupuestos

Durante la elaboración del presente proyecto no se ha encendido la pila de combustible y, por lo tanto, no se han consumido las materias primas necesarias para poder generar electricidad (Hidrógeno y Oxígeno). Sin embargo, se han requerido datos de un experimento anterior para poder realizar el estudio con datos propios de nuestra pila de combustible. Por este motivo, en el siguiente análisis económico, se ha realizado una estimación del coste que hubiera supuesto obtener tales datos.

Los principales costes utilizados durante la elaboración del proyecto son:

- Coste del estudio de ingeniería
 - Definición y recopilación de información
 - Diseño, cálculo y simulación
 - Generación de documentos.
- Costes de las pruebas experimentales (estimación)
 - Personal implicado en los experimentos
 - Desgaste de herramientas utilizadas
 - Recursos energéticos
 - Materia prima

5.1.1.1. Costes del estudio de ingeniería

A continuación se detallan los costes de estudio de ingeniería. Para la elaboración de estos costes se han desglosado los recursos que han sido necesarios para la elaboración del proyecto. En la **Tabla 12** se detallan los costes asociados a cada fase del proyecto.

PRESUPUESTO			
CONCEPTO			TOTAL (€)
Coste del personal	Horas (h)	Coste unitario (€/h)	
Ingeniero/ Estudiante	360	8	2880
Coste bibliográfico			
Consulta de artículos y revistas	-	-	300
Coste del Hardware y Software	% uso (%)	Coste unitario (€)	
Ordenador personal	15	1200	180
Licencia MS office	10	500	50
Material de oficina			
Consumibles de oficina, internet y electricidad	-	-	300
Presupuesto de la actividad			3710
5% imprevistos	-	-	185,5
PRESUPUESTO ESTUDIO INGENIERÍA			3895,5

Tabla 12. Costes del estudio de ingeniería realizado por el estudiante.

5.1.1.2. Costes de las pruebas experimentales

Tal y como se ha explicado en el punto anterior, para la realización del presente estudio no ha sido necesario el funcionamiento de la pila de combustible. No obstante, para obtener valores de los parámetros característicos de la pila fueron necesarios algunos experimentos previos al inicio del estudio. Sin estos parámetros no hubiese sido posible realizar la simulación y, por consiguiente, la optimización del sistema de refrigeración. Por este motivo, se ha creído necesario realizar una estimación del coste de las pruebas experimentales.

5.2. Impacto medioambiental y social

En este apartado se pretende considerar los efectos positivos o negativos de la producción de energía mediante las pilas de combustible tipo PEM en el ámbito medioambiental (salud, recursos naturales y medio ambiente), así como su contribución social y sus efectos en la sociedad.

Como se ha comentado anteriormente, la pila de combustible ha sido desarrollada y fabricada

por el centro de desarrollo de combustible e hidrógeno ZBT, por lo que el impacto ambiental en el transcurso del montaje no entra en el alcance del presente proyecto y, por tanto, de la evaluación de su impacto.

5.2.1. Impacto medioambiental

Para la evaluación del impacto medioambiental se ha considerado necesario detectar los puntos que influyen de manera notable en el ecosistema. Por este motivo, se identifican los diferentes puntos de la vida útil de la pila de combustible, desde que se inicia la producción de energía hasta su desmantelamiento. Así mismo, se considera importante tener en cuenta la fabricación y transporte del hidrógeno, dado que es un producto difícil de conseguir y con unos procesos de fabricación complejos.

Durante la vida útil del dispositivo no se presenta un impacto ambiental destacable. Al tratarse de una reacción química en la que los reactivos son el hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) dando como producto agua (H_2O), el impacto medioambiental de la producción de energía en el interior de la pila es nulo. Por otro lado, para la refrigeración y calentamiento de la pila es necesario la utilización de un ventilador y una resistencia eléctrica. Estos dos componentes se alimentan con energía eléctrica, la cual se desconoce si procede de la generación mediante energías convencionales o renovables. En todo caso, al tratarse de unos componentes tan pequeños, el impacto de estos al ambiente se puede considerar mínimo.

Así como durante la vida útil de la pila no se considera un impacto ambiental destacable, no sucede lo mismo durante la fabricación del hidrógeno. El hidrógeno es una materia prima que no se encuentra en la naturaleza, por lo que debe ser producido mediante procesos industriales. Esto implica un coste ambiental durante la generación de hidrógeno y su posterior transporte. Existen diferentes procesos industriales para la formación de hidrógeno, pero para realizar el estudio se ha tenido en cuenta únicamente el proceso de obtención de hidrógeno más utilizado: reformado de hidrocarburos con vapor de agua.

El reformado de hidrocarburos con vapor de agua permite obtener hidrógeno a partir de hidrocarburos, en particular del gas natural. Para ello es necesaria una gran cantidad de energía y, dependiendo del combustible utilizado, es necesario la remoción de contenidos de azufre y otras impurezas. Si se diese el caso de la utilización del azufre en el proceso, implicaría un elevado impacto medioambiental si se derramase el azufre en drenajes, alcantarillas o canales de agua.

Este proceso consiste en exponer al gas natural (contenido elevado de metano (CH_4), con vapor de agua a elevada temperatura y presión moderada. Los productos de la reacción son el hidrógeno (H_2) y el dióxido de carbono (CO_2) y, dependiendo de la mezcla reformada,

también monóxido de carbono (CO). Los dos últimos productos son muy perjudiciales para el medioambiente, con un impacto sobre él muy elevado. Además, la inhalación de monóxido de carbono es tóxica, lo que implica un riesgo si no se realiza la reacción correctamente.

Durante el proceso se llevan a cabo dos reacciones: Water Gas Shift (ec. 14) y proceso de purificación Pressure Swing Adsorption (PSA). Esta primera reacción da como producto un gas rico en dióxido de carbono (CO₂) e Hidrógeno (H₂) y, en menor cantidad, monóxido de carbono (CO). Este monóxido de carbono se elimina por medio de las reacciones de cambio de alta a baja temperatura (400°C y 200°C) y se produce una mezcla gaseosa de Hidrógeno (H₂), dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O) y un poco de monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄). Para finalizar, se realiza la etapa de purificación que permite obtener un hidrógeno puro al 99,99%.



Una vez finalizada la vida útil del producto, se debe tener precaución al depositar los materiales en sus correspondientes puntos de recogida o contenedores. De esta manera, se evitan impactos en el ecosistema que puedan influir negativamente. En este último proceso no se considera ningún impacto ambiental negativo.

5.2.2. Impacto social

En la actualidad la sociedad ha ido adoptando una posición más estricta hacia la contaminación del medioambiente y a sus efectos negativos hacia el usuario final, las personas. Por este motivo, en los últimos años se han realizado grandes avances tecnológicos para favorecer el desarrollo sostenible (energías renovables, arquitectura (ecodiseño), coches híbridos, ...). La función de potenciar el consumo eficiente y disminuir el impacto medioambiental está a la orden del día en nuestra sociedad, por lo que la pila de combustible puede considerarse un gran sustituto de los procesos de generación eléctrica convencionales.

Algunas de las características con mayor impacto social se detallan a continuación:

- 1- Alta eficiencia: la pila de combustible tiene un rendimiento muy elevado y con una gran diferencia respecto de los motores de combustión interna actuales (MACI). Por este motivo son dispositivos ideales para la utilización en automoción, disminuyendo la emisión de CO₂ a la atmosfera. Por otro lado, las pilas de combustible pueden utilizarse como sistemas de generación descentralizados y así evitar las centrales térmicas convencionales.
- 2- Estrategia política: El hidrógeno utilizado como fuente de generación de electricidad

permitiría reducir la dependencia social del petróleo y del gas natural. Sin embargo, la tecnología actual y las infraestructuras de producción y distribución todavía se encuentran en una fase poco madura. Sin el desarrollo de la tecnología e infraestructuras, el hidrógeno no puede competir con los recursos de producción energéticos actuales.

- 3- Simplicidad y bajo coste: las pilas de combustible son dispositivos que no necesariamente tienen que ser grandes para generar gran cantidad de electricidad. El diseño de las pilas de combustible consiste en estructuras por capas de elementos repetitivos y no tiene partes móviles. De esta manera, las pilas de combustible pueden producirse en cadena creando gran cantidad a un coste igual o inferior que las energías actuales. Actualmente, el elevado coste de las pilas se debe al uso de materiales costosos como las membranas poliméricas y los metales nobles (platino) en los catalizadores.
- 4- Vida útil larga: Al no tener partes móviles se puede esperar que las pilas sean muy duraderas, lo que permite conservarlas durante largos periodos de tiempo sin necesidad de que sean reemplazadas. Además, el coste de mantenimiento disminuye al no deteriorarse con tanta frecuencia. Estos aspectos implican una disminución en el coste de la pila a lo largo de su vida útil.
- 5- Silenciosas: no generan una gran cantidad de contaminación sonora, por lo que pueden ser utilizadas en aplicaciones como unidades portátiles, sistemas de backup o aplicaciones militares.
- 6- Tamaño y peso: el diseño compacto de la pila de combustible permite que el tamaño y, por tanto, el peso, sea inferior a otros dispositivos que generan la misma potencia eléctrica. Esto permite que disponga de un gran abanico de aplicaciones y funciones.

6. Conclusiones

La tecnología de generación de electricidad mediante pilas de combustible se postula como una de las grandes alternativas para la generación eléctrica de manera autónoma, limpia y de gran eficiencia. Sin embargo, aun que tiene un futuro prometedor, a día de hoy no se ha desarrollado lo suficiente como para poder realizar una sustitución parcial o total de las tecnologías actuales.

Por este motivo, en el presente proyecto se propuso la optimización de un sistema de refrigeración de una pila de combustible para poder alcanzar los rendimientos máximos de la pila. Una vez realizado el estudio de las diferentes alternativas para el sistema de refrigeración, se seleccionó el sistema de refrigeración mediante canales de refrigeración por flujo de aire.

Realizados los cálculos pertinentes y el estudio termodinámico de transferencia de calor de la pila se concluyó que la solución para la optimización del sistema de refrigeración pasaba por la de aumentar casi 9 veces el caudal de aire de entrada. Por ese motivo era necesario añadir un ventilador centrífugo del proveedor *Airtècnics*, con una alimentación al sistema de refrigeración superior a $110 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. El uso del aire caliente en la salida de la pila de combustible para aplicaciones externas podría ser de gran utilidad para los procesos de fabricación. Pero en el caso de la pila de estudio no alcanza suficiente temperatura como para poder llevar a cabo esta aplicabilidad. Como opción de mejora se propone mejorar la estructura externa de la pila para evitar tanta cantidad de pérdidas de calor. De esta manera se podría extraer un flujo de aire a una temperatura más elevada y útil para aplicaciones industriales. Para ello, se deberían repetir los cálculos realizados en el presente proyecto.

El impacto ambiental de las pilas de combustible, tanto en su vida útil como en su fabricación, es prácticamente nulo, pues el desarrollo de esta tecnología se prevé como un cambio a las tecnologías actuales con un gran impacto medioambiental. El único inconveniente es la fabricación y transporte del hidrógeno, pues es difícil de conseguir y con unos procesos de fabricación complejos.

Con todo esto, desde mi punto de vista, la tecnología de pilas de combustible debe seguir desarrollándose y trabajando para que podamos disfrutar toda la sociedad de sus ventajas, pues no solo ganaríamos en calidad de vida debido a la disminución de plantas térmicas para la generación de electricidad, sino que también reduciríamos los gastos en electricidad, pues la eficiencia de las pilas de combustible es mucho más elevada que cualquier tecnología actual de generación de electricidad.

7. Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Ramon Costa su ayuda en la realización de este proyecto y darme la oportunidad de profundizar en la prometedora tecnología de las pilas de combustible, así como por la ayuda prestada, el material aportado y sobre todo por la comprensión demostrada durante el transcurso del presente proyecto.

A mis compañeros de universidad Pol Jover y Guillermo Cuesta que han hecho que los últimos años de estudios hayan sido más llevaderos y que sin su compañerismo hubiese sido más difícil afrontar los retos planteados durante el Máster en Ingeniería Industrial.

Además, quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres, Guillermo y Marga el gran apoyo que me han transmitido desde que empecé mis estudios de ingeniería, ya que desde la distancia siempre me han ayudado a lograr mi objetivo. Agradecer también a mi hermana Laura que siempre ha estado a mi lado y me ha ayudado en los momentos más difíciles de la carrera, sin ellos no hubiese sido tan fácil.

A mi abuelo José Villalonga que, aunque no haya podido ver finalizar mis estudios en ingeniería, siempre confió en mí y que siempre he tenido presente a lo largo de mis estudios.

Muchas gracias.

8. Bibliografía

- Aguilera Escobar, L. (2009). *Análisis de un sistema de alimentación basado en pilas de combustible*. Madrid: Repositorio institucional de la Universidad Carlos III de Madrid.
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells Theory Practice*.
- Barbir, F. (2013). *PEM Fuel Cells. Theory and Practice*. San Diego: Elseiver Inc.
- Barreras, F., & Lozano, A. (2012). *Hidrógeno. Pilas de Combustible tipo PEM*.
- Chen, F. C., Gao, Z., Loutfy, R. O., & Hecht, M. (2003). *Analysis of Optimal Heat Transfer in a PEM fuel Cell Colling Plate*. Oak Ridge.
- Fluckiger, R., Tiefenauer, A., Aebi, C., Wokaun, A., & Buchi, F. (2007). *Thermal analysis and optimization of a portable, edge-air-cooled PEFC stack*.
- Fulchs, M. (2012). *Study of high tmperature PEM fuell cell (HT-PEMFC) Waste Heat recovery throught ejector based refrigeration*. Florida.
- Hashmi, M. S. (2010). *Cooling Strategies for PEM FC Stacks*. Hamburg.
- Heinzel, D. (2012). *Users Manual. High Temperature Fuel Cell (HT-PEMFC) Stack (12 Cells)*. Duisburg: Zentrum für Brennstoffzellen Technik.
- Huélamo Martínez, E., Perez Vara, R., Méndez-Vigo, A., & Álvarez González, J. (2003). *Simulación con ecosim de celdas de combustible*. Madrid: Empresarios agrupados, A.I.E.
- Juhl Andreasen, S. (2009). *Design and Control of Temperature PEM Fuel Cell*. Aalborg - Denmark.
- Kabza, D. (2016). *Fuel Cell Formulary*.
- Lipman, T. (2011). *An Overview of hydrogen production and storage systems with renewable hydrogen case studies*. Montpelier: CleanEnergy States Alliance.
- Pukrushpan, J. T., Peng, H., & Stefanopoulou, A. G. (2004). Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 12.
- San Martin, I., Ursúa, A., & Sanchis, P. (2014). Modelling of PEM Fuel Cell Performance:

Steady-State and Dynamic Experimental Validation. *Energies*, 31.

Technology, I. o. (2008). *SerEnergy Test Report*. Aalborg - Denmark.

Zhang, G., & Kandlikar, S. G. (2012). A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks. *ScienceDirect*, 18.